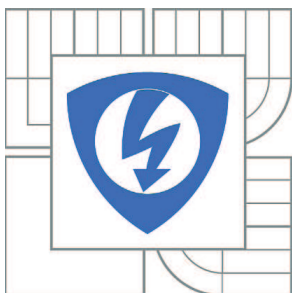


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

VYHODNOCENÍ VLIVU VÝKONU VÝVĚV NA PROUDĚNÍ PLYNU VE SCINTILAČNÍM DETEKTORU S OHLEDEM NA FUNKČNOST

THE INFLUENCE OF THE POWER VACUUM IN THE GAS FLOW SCINTILLATION DETECTOR
WITH REGARD TO FUNCTIONALITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

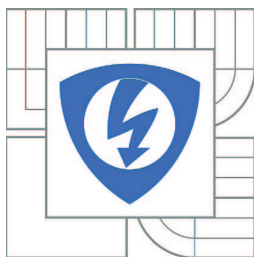
Bc. PETER ČERMÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ MAXA, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Peter Čermák

ID: 78575

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Vyhodnocení vlivu výkonu vývěj na proudění plynu ve scintilačním detektoru s ohledem na funkčnost

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou elektronové mikroskopie v oblasti vakua a se systémy SolidWorks a Cosmos FloWorks. Pomocí systému SolidWorks navrhnete variantu scintilačního detektoru a následně v systému Cosmos FloWorks vyhodnoťte rozdíl v oblasti proudění plynu v dráze sekundárních elektronů při různých výkonech použitých vývěj při různých tlacích v komoře vzorku u scintilačního detektoru enviromentálního rastrovacího elektronového mikroskopu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Práca je venovaná problematike elektrónovej mikroskopii, so zameraním na scintilačný detektor, kde je umiestnená komora oddeľujúca oblasti z rozdielnymi tlakmi. Pomocou systémov CAD a CAE bol vytvorený 3D model tohto detektora, na ktorom prebiehali výpočty zamerané na vplyv výkonu rôznych typov vývev na priebeh prúdenia plynu medzi komorami. Výsledky jednotlivých variant sú v grafickom prevedení porovnávané a vyhodnotené.

Abstract:

The work is devoted to problems of electron microscopy, focusing on the scintillation detector, which is located in chamber separating the field from different pressures. Using of the CAD and CAE was created 3D model of the detector, which took place on calculations focused to influence of the performance of different types of air pumps at gas flow between the chambers. The results of individual variants are compared in graphic form and evaluated.

Kľúčové slová:

Elektrónová mikroskopia, scintilačný detektor, prúdenie plynu, clonka

Keywords:

Electron microscopy, scintillation detector, gas flow, aperture

Bibliografická citácia

ČERMÁK, P. *Vyhodnocení vlivu výkonu vývěv na proudění plynu ve scintilačním detektoru s ohledem na funkčnost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 86 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D..

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Jiřímu Maxovi, Ph.D. za účinnú, metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a mnohé ďalšie cenné rady pri spracovaní diplomovej práce.

V Brne dňa 29.mája 2011

.....

podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	6
2	VÝVOJ ELEKTRÓNOVEJ MIKROSKOPIE.....	8
2.1	POZOROVANIE VOENÝM OKOM.....	8
2.2	OPTICKÝ MIKROSKOP	8
2.3	ELEKTRÓNOVÁ MIKROSKOPIA	8
2.4	TRANSMISNÝ ELEKTRÓNOVÝ MIKROSKOP (TEM)	9
2.5	POČIATKY RASTROVACIEHO ELEKTRÓNOVÉHO MIKROSKOPU (REM)	9
3	ELEKTRÓNOVÝ RASTROVACÍ MIKROSKOP (REM).....	11
3.1	PRINCÍP VZNIKU OBRAZU V REM	11
3.2	ZLOŽENIE ELEKTRÓNOVEJ TRYSKY A TUBUSU	13
3.3	DOPAD ELEKTRÓNOV NA PREPARÁT	14
3.4	DETEKTORY	14
3.5	SPRACOVANIE OBRAZU A ZÁZNAM	14
3.6	ODČERPÁVANIE VZDUCHU	15
3.7	ELEKTRONIKA A OVLÁDANIE	15
3.8	PRÍPRAVA VZORIEK A ICH VEĽKOSŤ	15
4	ENVIRONMENTÁLNY RASTROVACÍ ELEKTRÓNOVÝ MIKROSKOP	17
4.1	EREM TYPU AQUASEM	18
4.2	VÁKUOVÝ SYSTÉM MIKROSKOPU	19
5	VÁKUUM A VÝVEVY.....	21
5.1	CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI VÝVEV	22
5.2	ROZDELENIE VÝVEV	23
5.2.1	<i>Mechanické vývevy</i>	<i>24</i>
5.2.1.1	Vývevy piestové	24
5.2.1.2	Rotačné olejové vývevy	24
5.2.1.3	Rootsova výveva.....	25
5.2.2	<i>Molekulárne vývevy</i>	<i>26</i>
5.2.2.1	Vlastné molekulárne vývevy.....	26
5.2.2.2	Turbomolekulárna výveva	27
6	TEKUTINA – POJMY A FYZIKÁLNE VLASTNOSTI.....	28

6.1	FYZIKÁLNE VLASTNOSTI TEKUTÍN	28
7	PRÚDENIE PLYNOV	32
7.1	TURBULENTNÉ PRÚDENIE	32
7.2	VISKÓZNE (LAMINÁRNE) PRÚDENIE	34
7.2.1	<i>Prúdenie cez otvor</i>	<i>36</i>
7.3	MOLEKULÁRNE PRÚDENIE	38
7.3.1	<i>Prúdenie cez otvor</i>	<i>39</i>
7.4	NESTLAČITELNÉ A STLAČITELNÉ PRÚDENIE	40
8	SYSTÉMY VYUŽÍVANÉ PRI RIEŠENÍ PROBLÉMU.....	44
8.1	SOLIDWORKS	44
8.2	COSMOS FLOWWORKS	45
9	POPIS RIEŠENÉHO PROJEKTU	46
9.1	SCINTILAČNÝ DETEKTOR SEKUNDÁRNYCH ELEKTRÓNOV PRE EREM.....	53
10	VÝSLEDKY A ANALÝZY	55
10.1	MODEL SCINTILAČNÉHO DETEKTORA	55
10.2	NASTAVENIE OKRAJOVÝCH PODMIENOK	56
10.3	SPRACOVANIE VÝSLEDKOV ANALÝZY	57
10.3.1	<i>Prehľad priebehov tlakov a Machovho čísla</i>	<i>58</i>
10.3.2	<i>Porovnanie variant vývev z hľadiska dosiahnutého najnižšieho tlaku v komore scintilátora.....</i>	<i>65</i>
11	ZÁVER.....	68
12	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK	70
13	POUŽITÁ LITERATÚRA	71
14	PRÍLOHY	72

1 ÚVOD

Človek je už od pradávna tvor veľmi zvedavý a skúma veci okolo seba, ktoré doposiaľ nepozná. Už dávno zistil, že na to, aby sa dostal k jadru veci, mu len jeho oči stačiť nebudú. Prvými krôčikmi pre zväčšenie jednotlivých vecí boli lupa a okuliare. Až koncom 16.storočia sa podarilo zostrojiť prvý jednoduchý mikroskop. Autorom bol holandský brúsič šošoviek a výrobca okuliarov Zacharias Janssen. Pri konštrukcii použil, čo iné ako konkávne a konvexné šošovky.

Postupným vývojom, na ktorom sa podieľal, okrem mnohých iných, aj napríklad Galileo Galilei, sa podarilo v 30. rokoch 20. storočia dosiahnuť teoretickú hranicu optického mikroskopu, ktorá bola limitovaná rozlíšením 0,2 mikrometra a 2000 násobným zväčšením. V tej dobe sa však už vedelo niečo o urýchľovaní elektrónov a ich spracovaní, vďaka ktorým začali práce na výskume novej technológie mikroskopov. [9]

V r.1931 bol skonštruovaný prvý elektrónový mikroskop. Postupným vývojom sa elektrónová mikroskopia zlepšovala, no začali sa objavovať aj problémy a najmä nedostatky tejto technológie, ako bolo pozorovanie elektricky nevodivých vzoriek, vzoriek obsahujúcich vodu, alebo organických prvkov. Tieto problémy sa podarilo odstrániť v ďalšej etape vývojovej fáze rastrovacích elektrónových mikroskopov, tou je environmentálna elektrónová rastrovací mikroskopia (EREM). [1]

Neoddeliteľnou časťou EREM je detekčný systém, ktorý slúži k detekovaniu signálov elektrónov vzniknutých interakciou primárnych elektrónov a pozorovaného predmetu. Pre správnu funkciu detektora je potrebné, aby v komore detektora bolo vákuum určitej úrovne, čiže miesto s odčerpaným vzduchom.

Táto diplomová práca sa zaoberá analýzou výkonu vývev na prúdenie plynu v scintilačnom detektore používanom v EREM s využitím systémov 3D CAD, ktoré umožňujú modelovanie súčiastky, prípadne celého zariadenia, za pomoci výpočtovej techniky a následne tento model podrobiť analýze pomocou systémov CAE (Computer Aided Engineering – počítačová podpora inžinierskych prác). Využívaním systémov ako sú CAD a CAE sa v súčasnosti darí ušetriť nemalé finančné a i iné prostriedky pri vývoji nových zariadení,

keďže odpadá nutnosť niekoľkonásobnej výroby prototypov. Prototyp sa vytvára až po úspešných testoch a analýzach digitálneho modelu.

V teoretickej časti práce je zo začiatku v krátkosti popísaný vývoj mikroskopie a elektrónovej mikroskopie. Ďalšie kapitoly sú venované popisu princípu rastrovacieho elektrónového mikroskopu ako aj detekcii sekundárnych elektrónov, popisu environmentálneho rastrovacieho mikroskopu vrátane výhod a nedostatkov. Keďže je práca venovaná výkonu vývev, ďalšia kapitola nás oboznámi s rozdelením vývev vrátane popisu niektorých vývev využívaných v elektrónovej mikroskopii. V neposlednej rade sú spomenuté i fyzikálne vlastnosti tekutín ako i popis prúdenia plynov. V práci sú taktiež v stručnosti opísané počítačové programy SolidWorks a Cosmos FloWorks, ktoré boli využívané pri riešení projektu.

V praktickej časti práce je popis trojrozmerného modelu scintilačného detektora, ktorý bol vytvorený pomocou systémov CAD a CAE na základe matematicko-fyzikálneho modelu, ako zjednodušený model pre analýzu prúdenia plynu cez otvory v clonkách použitím rôznych kombinácií vývev. Je tu skúmaný vplyv použitia kombinácií vývev na dosiahnutie požadovaných tlakov a vplyv na priebeh Machovho čísla v jednotlivých komorách. Výsledky sú graficky porovnávané a zhodnotené.

2 VÝVOJ ELEKTRÓNOVEJ MIKROSKOPIE

Slovo mikroskopia je odvodené od gréckeho slova mikros, čiže malý a skopeo, znamená pozorovať, dívať sa na niečo. Od ranných počiatkov vzniku vedy ako takej, je záujem o pozorovanie stále menších a menších detailov. V biológii sa skúmajú bunky a ich štruktúra, baktérie, víry a iné častice. Vedci v technických oboroch sa zaoberajú vlastnosťami materiálmí, skúmajú poruchy a nehomogénnosť v kryštálovej mriežke. V odvetviach geológie umožnila detailná štúdia hornín, minerálov a fosílií pochopiť pôvod našej planéty a jej zdrojov, ako sú minerálne a nerastné suroviny a pomáha pri ich následnom spracovaní.

2.1 Pozorovanie voľným okom

Ľudské oko dokáže rozlíšiť dva body vzdialené od seba 0,2 mm. Ak je vzdialenosť bodov menšia ako 0,2 mm, body nám splývajú v jeden. Táto vzdialenosť sa nazýva rozlišovacia schopnosť alebo aj rozlíšenie oka. Pre zväčšenie tejto vzdialenosti, čiže pozorovanie bodov o vzdialenosti menšej ako 0,2 mm, používame šošovky ako je napríklad lupa, alebo sústavu šošoviek – mikroskop.

2.2 Optický mikroskop

Moderný optický mikroskop má zväčšenie približne 1000x a umožňuje oku rozpoznať objekty od seba vzdialené 0.0002 mm. Pri pretrvávajúcej snahe o dosiahnutie lepšieho rozlíšenia, bol zistený poznatok, že rozlišovacia schopnosť optického mikroskopu nie je obmedzená len počtom a kvalitou použitých šošoviek, ale súčasne aj vlnovou dĺžkou svetla používaného pre osvetlenie skúmaného predmetu. Z tohto dôvodu nebolo možné, na pozorovanom objekte, rozlíšiť dva body vzdialené od seba niekoľko stoviek nanometrov. Malých zlepšení sa podarilo dosiahnuť použitím žiarenia s kratšou vlnovou dĺžkou, čiže modré svetlo, alebo ultrafialové žiarenie a ďalším krokom bolo ponorenie preparátu a prednej šošovky objektívu do kvapaliny s vysokým indexom lomu, ako je napr. olej. Obe tieto metódy pomohli dostať rozlišovaciu schopnosť na hodnotu tesne pod 100 nm.

2.3 Elektrónová mikroskopia

V roku 1920 bolo objavené, že urýchlené elektróny sa chovajú vo vákuu ako častice svetla. Pohybujú sa priamočiaro a majú vlnovú dĺžku približne 100 000 – krát menšiu ako

svetlo. Naviac bolo zistené, že tak ako šošovky a zrkadlá ovplyvňujú viditeľné svetlo, tak elektrické častice sa dajú ovplyvniť magnetickým a elektrickým poľom. Dr. Ernst Ruska z Berlínskej univerzity tieto javy skombinoval a v roku 1931 skonštruoval prvý prežarovací (transmisný) elektrónový mikroskop (skrátene TEM). V tomto prvom elektrónovom mikroskope boli použité dve magnetické šošovky. O tri roky neskôr bola pridaná tretia šošovka, čím sa podarilo dosiahnuť rozlíšenie 100 nm, čo bolo dva-krát lepšie rozlíšenie akého sa podarilo v tej dobe dosiahnuť u optického mikroskopu. V súčasnosti sa dosahuje rozlíšenia 0.1 nm pri zväčšení jeden milión, k čomu sa v zobrazovacej sústave využíva päť magnetických šošoviek.

2.4 Transmisný elektrónový mikroskop (TEM)

Transmisný (prežarovací) elektrónový mikroskop je možno prirovnávať k diaprojektoru. Svetelný zdroj vyžaruje rozbiehajúci sa zväzok lúčov, ktorý je pomocou šošoviek kondenzora upravený na zväzok rovnobežných lúčov. Tento zväzok prechádza diapozitívom (objektom) a následne je optickou šošovkou objektívu, ako zväčšený obraz, zaostrený na projekčnú plochu.

V elektrónovom mikroskope je svetelný zdroj nahradený zdrojom elektrónov zo žhaveného volfrámového vlákna vo vákuu, sklenené šošovky sú nahradené magnetickými a namiesto projekčnej plochy je použité fluorescenčné tienidlo, ktoré v mieste dopadu jednotlivých elektrónov vyžaruje svetlo. Celá dráha elektrónov musí byť umiestnená vo vákuu a preparát musí byť veľmi tenký, aby ním mohli elektróny prenikať. Nanešťastie, nie všetky preparáty môžu byť zhotovené tak, aby boli dostatočne tenké pre použitie tohto mikroskopu. Okrem toho je veľký záujem pozorovať podrobnosti a štruktúru na povrchu preparátu, z ktorého sa zobrazila vždy len veľmi obmedzená oblasť a ešte s veľkým skreslením. Preto si táto metóda štúdia nenašla širšieho uplatnenia ako v priemysle tak ani vo výskume.

2.5 Počiatky rastrovacieho elektrónového mikroskopu (REM)

O prvú publikáciu popisu riadkového snímania, čiže rastrovania v časopise sa zaslúžil Dr. Max Knofl v roku 1935. Okrem toho v roku 1937 nemecký lekár dr. Manfred von Ardenne uskutočnil experimenty, ktoré sa dajú pokladať za rastrovací elektrónový mikroskop (anglicky Scanning electron microscope – SEM). Až v roku 1942 bol po prvý raz

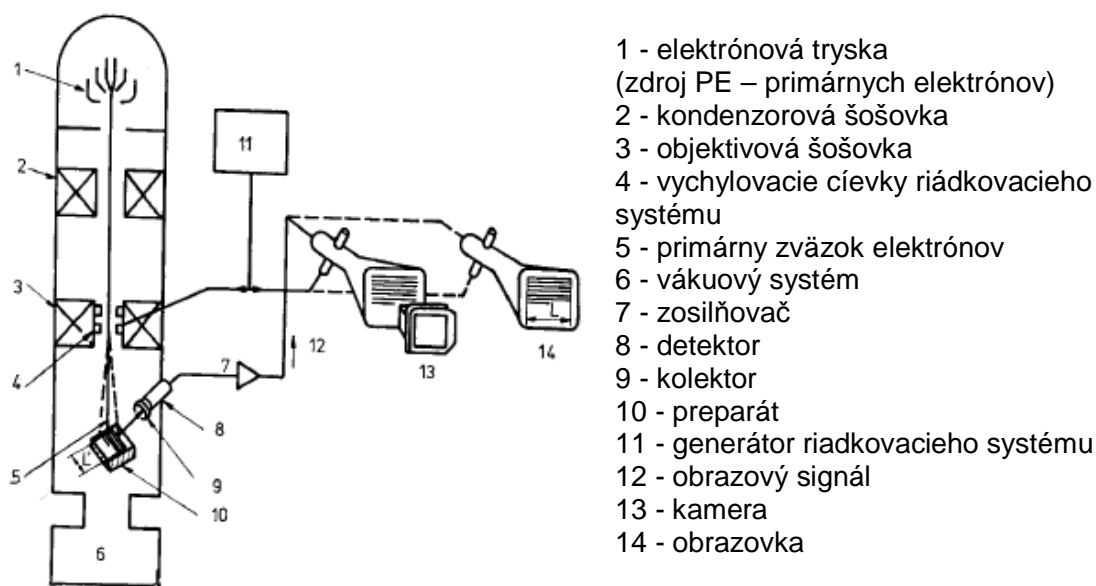
popísaný skutočný REM s rozlišovacou schopnosťou 50 nm a 8000 násobným zväčšením. Postarali sa o to traja Američania – D.Zworykin, Dr.Hiilier a Dr.Snijder. V súčasnosti majú prístroje REM rozlišovaciu schopnosť 1 nm a zväčšenie viac ako 400 000 krát.

No kombinácia metód využívaných v TEM a REM, označovaná ako prežarovacia elektrónová mikroskopia (STEM), bola prvý krát popisovaná už v roku 1938 dr. Manfredom von Ardennom. Nie je však známe aké mal prístroj parametre. Prvý komerčne vyrábaný kombinovaný prístroj vybavený jednotkou STEM bol vyvinutý dr. Ongom z firmy Philips Electronic Instruments v USA v roku 1969 pod označením Philips EM 200. Mal rozlišovaciu schopnosť 25 nm a zväčšenie 100 000x. Moderné prístroje STEM majú rozlíšenie 1 nm a zväčšenie až 1 000 000x.

3 ELEKTRÓNOVÝ RASTROVACÍ MIKROSKOP (REM)

3.1 Princíp vzniku obrazu v REM

Skenovací elektronový mikroskop (REM) je prístroj, ktorý vytvára zväčšený obraz. Namiesto optickej metódy je obraz vytváraný pomocou ostro zaostrovaného zväzku elektrónov. Tento dopadajúci zväzok vyvoláva fyzikálny signál, ktorý je len zdrojom informácií o mieste dopadu primárneho elektrónového zväzku na povrch vzorku. Je teda akousi sondou, pohybujúcou sa po povrchu za vzniku signálu, ktorý nesie informácie o charakteristike miesta vzorku, po ktorom tento zväzok elektrónov prešiel. Schematický princíp činnosti je znázornený na obr 3.1.



Obr. 3.1 Schématické znázornenie činnosti a hlavných prvkov REM [7]

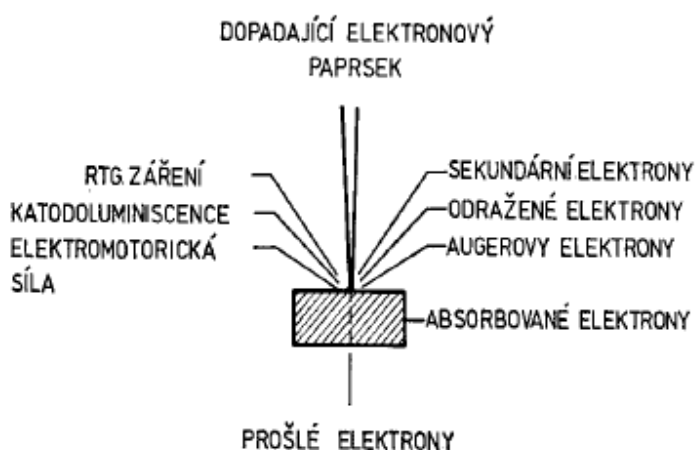
Primárny zväzok vytvárajú emitované elektróny volfrámovou katódou, urýchľované kladným napätím na anóde. Tento je elektromagnetickými šošovkami zaostrovaný na povrch skúmaného vzorku. Vychyľovacie cievky riadkovacieho systému umožňujú, aby tento zväzok bod po bode a riadok po riadku systematicky prechádzal, riadkoval (skenoval) vymedzenú, spravidla štvorcovú, plošku spôsobom veľmi podobným, ako sa používa v televíznej technike. S pohybom primárneho zväzku elektrónového je synchronizovaný pohyb elektrónového

zvázku obrazovky mikroskopu. Jas zobrazovaného obrazu na obrazovke je modulovaný intenzitou signálu zo snímacieho detektoru, ktorý odpovedá jednotlivým bodom dopadu primárneho zvázku. Takže kontrast na obrazovke sa vytvára ako výsledok intenzity v jednotlivých bodoch dopadu primárneho zvázku a zväčšenie je dané pomerom strany obrazovky k dĺžke úseku riadkovaného na povrchu vzorku. Podľa použitého druhu detektora a spracovania signálu je možné získať informácie o štruktúre útvarov vytvárajúcich povrchový reliéf, ale aj o zmenách v chemickom zložení alebo o niektorých ďalších fyzikálnych vlastnostiach daného vzorku.

Elektróny primárneho (PE) zvázku dopadajú v REM na povrch vzorku o energii niekoľko tisíc eV. Prenikajú do určitej hĺbky pod povrch, kde nastáva ich rozptýlenie alebo absorpcia. Rozptyl elektrónov môže byť pružný alebo nepružný.

Pri pružnom rozptyle PE v povrchovej vrstve látky nestrácajú svoju energiu, ale dochádza ku zmene smeru pohybu a následne sú pod určitým uhlom odrazené späť na povrch vzorku, označujú sa ako spätné odrazené elektróny.

Pri nepružnom rozptyle sú PE brzdené v kryštálovom prostredí, pričom predávajú svoju energiu voľným elektrónom a kryštálovej mriežke. Pre funkciu REM sú významné interakcie PE s elektrónmi pevnej látky. Elektróny pevnej látky sú pôsobením energie PE excitované, čo má za následok, podľa druhu excitácie, vznik sekundárnych elektrónov, Augerových elektrónov, charakteristického röntgenového žiarenia a iných (viď obr. 3.2).



Obr. 3.2 Fyzikálne signály vyvolané dopadom primárneho el. zvázku[7]

Z tejto skupiny sekundárnych elektrónov je potreba vybrať najvhodnejšie pre zobrazenie určitého požadovaného stavu, či už topografie, chemického zloženia alebo fyzikálnych vlastností. Toto je možné vykonať správnou voľbou vhodného detekčného systému. Pre bežné účely sa najčastejšie volí polovodičový detektor sekundárnych elektrónov. Ako sekundárne elektróny sú označované elektróny emitované z povrchu vzorku, ktorých energia je menšia ako 50 eV. Intenzita týchto elektrónov závisí na atómovom čísle pevnej látky, na uhle dopadu a energii PE. Sekundárne elektróny nesú informácie o štruktúre povrchu a chemickom zložení pozorovaného vzorku, ktoré sú zaznamenávané špeciálnym detektorom. V závislosti na tvare preparátu, je amplitúda sekundárnych elektrónov časovo premenná. Ako už bolo spomenuté, pomer veľkosti obrazu na monitore ku veľkosti skenovanej plochy preparátu je označovaný ako zväčšenie. Hodnota zväčšenia sa mení tým, že sa zmenšuje alebo zväčšuje veľkosť snímanej plôšky na preparáte. Obraz na obrazovke sa ukladá či už v podobe videozáznamu alebo digitálnej fotografie do pamäti počítača. [7], [6]

Zloženie rastrovacieho elektrónového mikroskopu:

- tubus s elektrónovou optikou
- vákuový systém
- elektronika

Tubus je podstatne kratší, pretože sú v ňom len tri šošovky, ktoré sústredujú elektróny na malú plôšku preparátu, okrem toho nie sú pod preparátom žiadne ďalšie šošovky. Komora pre preparát je naopak väčšia, pretože technológia SEM nijako neobmedzuje veľkosť preparátu, tá je obmedzená len veľkosťou komory.

3.2 Zloženie elektrónovej trysky a tubusu

Zdrojom elektrónov je elektrónová tryska, najčastejšie sa používa volfrámové žhavené vlákno, ktoré je umiestnené na Wehneltovom valci. Zväzok elektrónov je upravovaný a zaoštrovaný elektromagnetickými šošovkami. Tubus obsahuje jednu alebo viac kondenzorových šošoviek, objektívovú šošovku, vychýľovacie cievky rastrov a cievky stigmátorov pre korekciu astigmatizmu.

3.3 Dopad elektrónov na preparát

Na každé miesto vzorky je zameraný úzky lúč elektrónov, ktorý prechádza riadok po riadku. Dopad elektrónov na preparát spôsobí hneď niekoľko javov, Päť z nich je využívaných pri bežnom REM.

1. emitované sekundárne elektróny.
2. časť z primárnych elektrónov je odrazená (spätne odrazené elektróny)
3. časť elektrónov je pohltaná preparátom (absorbované elektróny)
4. preparát emituje rentgenové žiarenie (X lúče)
5. preparát emituje fotóny svetla

Jednotlivé javy sú závislé na štruktúre povrchu vzorku, atómovom čísle a chemickom zložení a javy spolu súvisia. Hlavné javy využívané pre zobrazenie povrchu vzorku sú sekundárne elektróny, spätne odrazené elektróny a absorbované elektróny. A to z dôvodu, že ich počet je závislý od povrchu vzorku.

3.4 Detektory

Detektor sekundárny elektrónov - SE detektor

Detektor spätne odrazených elektrónov – BSE detektor

Detektor prešlých elektrónov – TE detektor

Detekcia charakteristického RTG žiarenia – EDS/WDS

Difrakcia spätne odrazených elektrónov EBSD

EDS/WDS sa využíva pre analýzu chemického zloženia vzoriek. Metóda dokáže určiť aké prvky a v akom množstve sa vo vzorku nachádzajú.

EBSD sa používa pre kryštalografickú analýzu vzorku. Metóda dokáže určiť orientáciu kryštálovej mriežky skúmaného vzorku. [7]

3.5 Spracovanie obrazu a záznam

U REM prístrojov sa obvykle nachádzajú dva obrazové monitory. Jeden je určený pre obsluhu prístroja. Druhý má vysoké rozlíšenie a je vybavený fotoaparátom. Rastrovacie

mikroskopy FEI majú obrazovú pamäť, v ktorej je obraz vytváraný riadok po riadku a zobrazovaný použitím TV frekvencie, aby na monitore bol obraz stály a bez blikania, čo umožňuje pozorovanie a správnu voľbu parametrov. Obraz je v digitálnej podobe a môže byť ukladaný do elektronickej pamäti pre následné spracovanie, prípadne analýzu. K samotnému spracovaniu patrí mnoho techník, ako je zmena kontrastu, inverzia (zmena čiernej na bielu atd.), kódovanie farieb, odčítanie obrazu jedného detektora od obrazu iného detektora, mixovanie obrazov z rôznych detektorov a podobne. Pre získanie najlepšej možnej informácie o skúmanej vzorke je možné použiť akúkoľvek kombináciu jednotlivých techník.

3.6 Odčerpávanie vzduchu

Pre správnu prácu REM je potrebné, aby bolo zaručené dosiahnuté dostatočné vysoké vákuum a to za predpokladu, že nám umožnia v prijateľnom čase výmenu vzoriek, vlákna a apertúry. To nám zabezpečuje buď olejová difúzna výveva alebo turbomolekulárna výveva. V oboch prípadoch sa používa ešte predbežné odčerpávanie vzduchu rotačnou olejovou vývevou. Tieto kombinácie umožňujú výmenu vzoriek za menej ako 2 minúty. Vákuový systém REM je plne automatizovaný, čím je chránený proti chybám obsluhy.

3.7 Elektronika a ovládanie

Jednotlivé elektronické jednotky sú umiestnené v konzole mikroskopu. Riadené a ovládané sú osobným počítačom pomocou klávesnice a myši.

Na dosiahnutie pokiaľ možno čo najväčšieho rozlíšenia a kvality obrazu musia byť napätia a prúdy pre elektrónovú trysku a šošovky kondenzora dostatočne stabilné. Okrem toho musia byť stabilizované aj elektronické obvody detektorov. Stabilita sa pohybuje rádovo na úrovni jednej milióntiny.

3.8 Príprava vzoriek a ich veľkosť

Veľá vzoriek môže byť vložených do komory bez akýchkoľvek úprav. Jediný požiadavok na vzorku je, aby zvládla vákuum a bombardovanie elektrónmi. Vzorky obsahujúce kvapalné zložky, ako napr. vodu, je nutné najskorej odstrániť procesom sušenia, v určitých prípadoch sa využíva aj vymrazovanie. Vzorky z nevodivých materiálov sa počas bombardovania elektrónmi nabíjajú, z tohto dôvodu musia byť potiahnuté vodivou vrstvou. Vhodnými

prvkami ako vodivý materiál sú ťažké prvky, ako napríklad zlato, ktoré vykazuje dobrú sekundárnu emisiu. Okrem toho je tento povlak jednozrnný a veľmi ľahko sa nanáša rozprašovaním. Hrúbka vodivého povlaku býva okolo 10 nm. Vo všeobecnosti je príprava vzorky pre REM oveľa jednoduchšia ako pre TEM.

V určitých prípadoch nie je možné pripraviť vzorky pre REM, ako napríklad v prípade kremíkovej dosičky používanej pri výrobe integrovaných obvodov alebo samotné integrované obvody. V takýchto prípadoch sú obvody skúmané počas prevádzky, ale pre získanie ich obrazu je použitá špeciálna technika. Jednou z techník je nízkonapäťový REM. V súčasnosti môže byť REM prispôsobený rôznym špeciálnym technikám, často však vyžaduje pripojenie vhodného príslušenstva .

Maximálna veľkosť vzorky je častým faktorom určujúcim cenu daného modelu REM. Rôzne modely sa líšia veľkosťou komory pre vkladanie vzoriek. Čím je väčšia, tým väčší vyžaduje pohyb goniometra a väčšiu sústavu výev pre dosiahnutie dostatočnej úrovne vákua.

Najzákladnejšie modely sú schopné pracovať so vzorkami o priemere niekoľko centimetrov a dovoľujú ich pohyb v rozsahu 50 mm v smeroch X a Y. Naopak najväčšia komora pracuje so vzorkami do priemeru 200mm a dovoľuje ich pohyb 150 mm vo všetkých smeroch. Všetky modely umožňujú natáčanie vzoriek o veľké uhly a rotáciu o 360 stupňov.

Jednotlivé vzorky sú umiestňované do držiakov vzoriek. Držiak umožňuje pohyb vzorky vo vodorovnej rovine v smere os X,Y, vo zvislej osi Z, prípadne nakláňanie a otáčanie v závislosti od ceny a typu prístroja. Jednotlivé pohyby vykonávajú malé motorky a sú riadené počítačom. Špecializované firmy vyrábajú v širokej škále držiaky, ktoré navyše umožňujú zahrievanie, chladenie, prípadne aj deformovanie vzoriek. [7]

4 ENVIRONMENTÁLNY RASTROVACÍ ELEKTRÓNOVÝ MIKROSKOP

Najväčší problém, ktorý prístroje REM majú, sú vysoké požiadavky na snímané vzorky. Musia byť čisté, suché, elektricky nevodivé a musia byť schopné znášať vákuum.

Tento problém rieši, nedávno vyvinutý, „environmentálny“ rastrovací elektrónový mikroskop (EREM), ktorý je schopný pracovať so vzorkami, ktoré tieto požiadavky nespĺňajú. Ako príklad môžeme uviesť kozmetické prípravky, tuky, bavlnené tkaniny. Technológia EREM i REM konštrukčne vychádzajú z rovnakého základu, rozdiel je len v oddelení vákuového prostredia v tubuse mikroskopu od prostredia komory vzorku s vyšším tlakom pomocou diferenciálne čerpanej komory. Z čoho sa dá usudzovať, že EREM je posledným vývojovým štádiom REM a súčasne predstavuje jeden z posledných vývojových trendov mikroskopických metód vôbec. [14] V podmienkach vysokého tlaku plynov, až 3000 Pa oproti tlaku pod 0,001 Pa v klasickom rastrovacom elektrónovom mikroskope, umožňuje skúmanie vzoriek živej i neživej prírody.

Všetky pokusy, kedy mala byť skúmaná vzorka umiestnená do „environmentálnej“ komory izolovanej, či už jednou alebo viacerými diferenciálnymi čerpacími apertúrami od hlavného tubusu, boli neúspešné pre nedostatok vhodných detektorov elektrónov, ktoré by pracovali v atmosfére komory. Až dokiaľ firma ElectroScan v Bostone nevyvinula detektor sekundárnych elektrónov, pracujúciv plynnom prostredí. Detektor využíva kaskádneho zosilňovania pre zosilnenie signálu sekundárnych a pre tvorbu kladne nabitých iónov, ktoré sú k sebe priťahované záporným nábojom na izolovanom povrchu vzorky a tento náboj účinne potlačujú (neutralizujú).

Pôsobením vysokého tlaku v komore vzorky environmentálneho rastrovacieho mikroskopu dochádza k nárastu interakcií elektrónov s molekulami a atómami plynu, ktoré vedú k nevyhnutnému rozptylu primárneho elektrónového zväzku. So zvyšujúcim sa tlakom plynu, pracovnou vzdialenosťou a s klesajúcim urýchľovacím napätím zväzku, tento rozptyl primárnych elektrónov rastie. Toto všetko má za následok zväčšenie priemeru stopy primárneho elektrónového zväzku, čo sa samozrejme prejaví zhoršením rozlišovacej schopnosti mikroskopu. Tieto nedostatky sú ale vykompenzované tým, že jednotlivé vzorky

môžeme pozorovať bez nutnosti jejich špeciálnej prípravy, či výskytu nežiadúcich vlastností jejich povrchu.

Pri tlaku v komore vzorky EREM vyššom ako 200 Pa sa dôsledkom ionizačných zrážok atómov a molekúl plynov s elektrónmi neprejavuje záporný náboj na izolačných vzorkách, keďže tento náboj je dostatočne kompenzovaný kladnými zrážkovými iónmi. Vďaka kompenzácii elektrického náboja, je nám umožnené pozorovanie elektricky nevodivých preparátov a to bez nutnosti pokrytia ich povrchu elektricky vodivou pastou. Dokonca je možné pozorovať vzorky obsahujúce menšie, či väčšie množstvo vody a to použitím vyššieho tlaku plynov (ideálne vodnej pary) v komore vzorky (viac ako 611 Pa pre 0°C).

Obrovský rozdiel tlakov, ktorý sa objavuje medzi priestorom komory vzorky ($3 \cdot 10^3$ Pa) a priestorom zdroja elektrónov (10^{-3} – 10^{-9} Pa, podľa typu katódy), sa darí udržať vďaka diferenciálnemu čerpaniu plynu a systému clôn obmedzujúcich tlak. Tieto sú najčastejšie umiestnené v tubuse EREM.

4.1 EREM typu AQUASEM

Nová konštrukcia environmentálneho mikroskopu je založená na zdokonalenej elektrónovo optickej časti tubusu, s veľkosťou primárneho zväzku v jednotkách nanometrov a súčasne na zmenenej koncepcii diferenciálne čerpanej komory, umožňujúcej dosiahnuť pri menšej pracovnej vzdialenosti väčšie zorné pole. Ďalej je tu účinnejší čerpací systém, v ktorom sú použité apertúrne clony pre oddelenie jednotlivých rozdielnych tlakov. Takýto mikroskop umožňuje pracovať do tlaku 2000 Pa, zatiaľ čo v diferenciálne čerpanej komore je tlak 30 Pa a v tubuse mikroskopu je vákuum, čiže tlak 10^{-3} Pa. Za zmienku stojí hlavne originálny prvok ako je monokryštalický detektor spätne odrazených elektrónov so zabudovaným kryštálom YAG nového typu. Kryštál tvorí clonu pre oddelenie tlakov a súčasne je i nosnou časťou pre elektródový systém ionizačného detektora, ktorý pracuje na princípe zrážkového mechanizmu medzi signálnymi elektrónmi a molekulami plynu. K výbave mikroskopu patrí aj kombinovaný detekčný systém signálnych elektrónov, ktorý umožňuje záznam obrazu vzorky v rôznych kontrastných módoch. Ďalšou súčasťou tohto mikroskopu je zariadenie pre pripúšťanie vodných pár a ich reguláciu v komore vzorky v ľubovoľnom rozmedzí tlakov a zariadenie pre chladenie vzorky do - 30°C. Použitím metódy cyklického zavodňovania vzorky pomocou vodnej injekcie zabudovanej ku komore vzorky sa

dosiahlo obmedzenia deštrukcie mäkkých tkanív počas samotného procesu čerpania. Nakoľko je mikroskop univerzálny, môže pracovať ako vo vákuu, tak i za zvýšeného tlaku v komore vzorky. Rozlíšenie dosahované vo vákuových podmienkach je 4 nm a zväčšenie je až 300 000 násobné. [7]

4.2 Vákuový systém mikroskopu

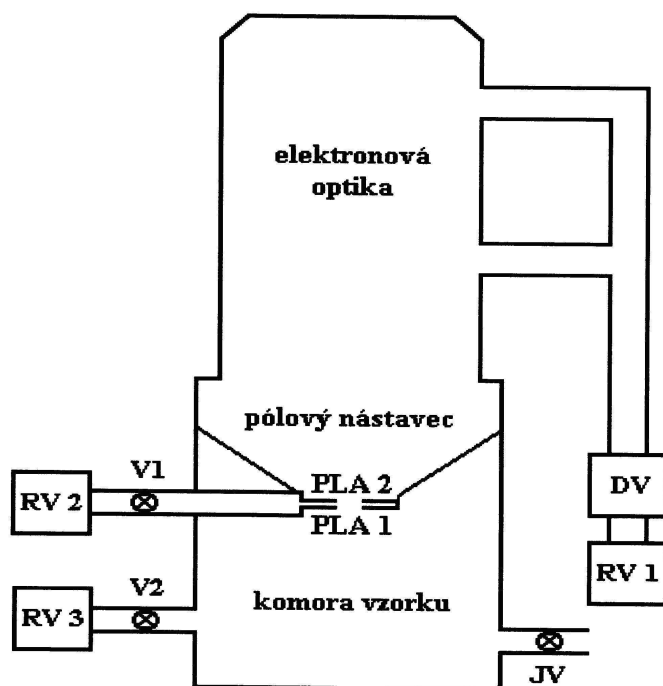
Kľúčovými konštrukčnými požiadavkami, na ktorých závisia jednotlivé funkcie ako aj zásadné výhody a možnosti mikroskopu EREM sú vákuum a rozdielne tlaky v jednotlivých častiach mikroskopu. Zjednodušené schéma vákuového systému environmentálneho mikroskopu, pracujúceho s priamo žeravenou katódou z volfrámu a komorou vzorky s tlakmi rádovo 10^{-3} Pa je na obr. 4.1. Daný mikroskop je potom ďalej zobrazený na obr.9.1 a 9.2 a ďalších obrázkoch.

Tubus - objektív je časť mikroskopu s najnižším tlakom - 10^{-3} Pa.

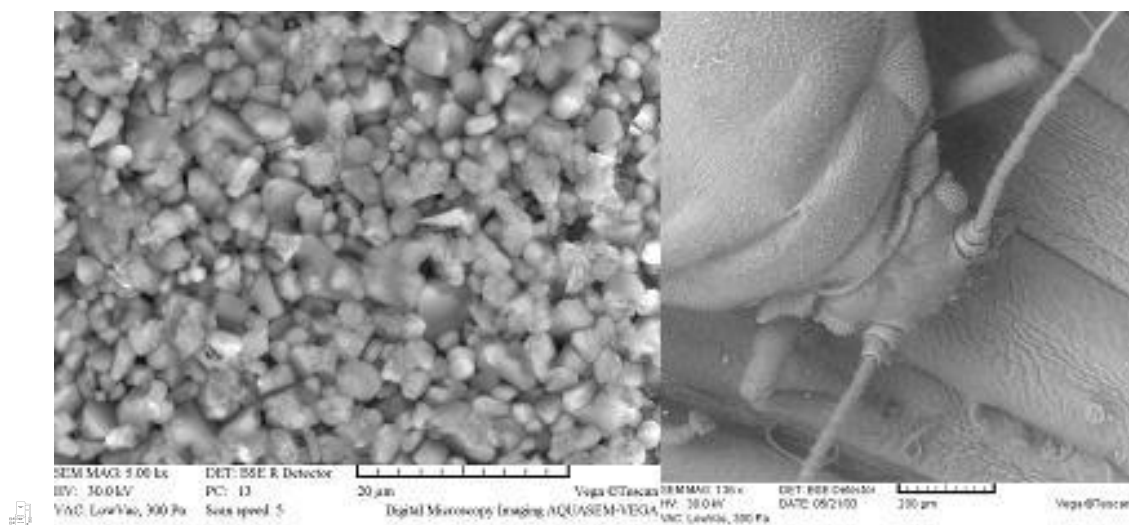
Využíva sa tu vysokého napätia na generáciu a urýchľovanie elektrónového zväzku. Toto veľmi vysoké vákuum v celej časti tubusu takisto prispieva k bezproblémovému šíreniu samotného elektrónového zväzku, ktorého elektróny by inak mohli byť rozptýlené molekulami vzduchu. Celý tubus mikroskopu je odčerpávaný rotačnou vývevou – RV1, ktorá zabezpečuje pracovné prostredie pre difúznú vývevu DV. Za pomoci tejto vývevy je už v tubuse dosiahnuté vhodného tlaku pre správnu funkciu priamo žeravanej volfrámovej katódy. Aby bolo možné udržať tlak 10^{-3} Pa bolo potrebné použiť dvojicu tlak obmedzujúcich clôn. Tieto clony s malými otvormi umožňujú potlačiť prúdenie plynu medzi jednotlivými priestormi mikroskopu s rozdielnymi tlakmi a spoločne pomáhajú dosiahnuť požadovaného spádu tlakov, účinným čerpaním jednotlivých oblastí.

Priestor medzi clonami sa nazýva komorou diferenciálneho čerpania. Tento priestor je odčerpávaný rotačnou alebo turbomolekulárnou vývevou RV2. Pre veľmi vysoké požiadavky na tesnosť, sa pozdáva byť účelné minimalizovať priemery otvorov jednotlivých clôn. Avšak je veľmi dôležité zvážiť požiadavky na elektrónovej clony PL2, ktorá ma takisto funkciu projekčnej šošovky mikroskopu ako aj v prípade PL1 znižovanie zorného poľa mikroskopu.

Komora vzorky je miesto alebo časť environmentálneho mikroskopu s najvyšším tlakom. Pracovného tlaku plynu sa v tomto priestore dosiahne ustavením rovnováhy medzi pripúšťaním plynu a čerpaním komory rotačnou vývevou RV3. Ihlový ventil JV slúži k pripúšťaní plynov do komory vzorky.(obr.4.1) [7]



Obr. 4.1 Schéma dvojstupňového systému diferenčného čerpania pre EREM [7]



Obr. 4.2 Korundová keramika Al_2O_3 a vošky na liste rybízu [7]

5 VÁKUUM A VÝVEVY

Výroba vákua, potrebného pre uspokojivú činnosť väčšiny zariadení, ktoré pre svoju činnosť vákuum potrebujú, je v podstate otázkou zriedenia plynu alebo vzduchu, ktorý bol na počiatku pod atmosférickým tlakom, na hodnotu zlomku tohto tlaku, zníženie tlaku z 101 325 Pa na $1,33 \cdot 10^{-5}$ alebo až na hodnotu $1,33 \cdot 10^{-6}$ Pa (≈ 760 torr na 10^{-7} až na 10^{-8} torr), podľa potreby.

Vákuum nestačí charakterizovať len tým, že je to nižší tlak plynu ako atmosférický tlak. Z hľadiska vákuovej techniky a jej aplikácií je to práve oblasť tlakov menších ako 133 Pa to najzaujímavejšie práve. Je to oblasť, kedy nastáva rad rôznych fyzikálnych javov využívaných vo vákuových zariadeniach. Táto zmena fyzikálnych vlastností súvisí aj s počtom vzájomných zrážok molekúl a aj zrážok so stenou vákuového zariadenia. So znižovaním tlaku rastie stredná voľná dráha a od určitého tlaku začnú prevládať zrážky molekúl so stenami nádoby. Preto sa aj pomer medzi strednou voľnou dráhou λ a lineárnymi rozmermi vákuovej komory používa ako kritérium rozdelenia vákua na niekoľko oblastí. Z tab. 5.1 je vidieť, kde predpokladané lineárne rozmery vákuovej komory sú rádovo centimetre.[2]

	Hrubé vákuum	Jemné vákuum	Vysoké vákuum	Ultravákuum
Rozsah tlakov [Pa]	101 325 – 100	100 – 0,1	0,1 – 10^{-6}	menej ako 10^{-6}
Počet častíc v 1 cm ³	10^{19} – 10^{16}	10^{16} – 10^{13}	10^{13} – 10^8	menej ako 10^8
Stredná voľná dráha	značne menšia ako rozmer vákuovej komory $\lambda \ll d$	menšia alebo rovnaká ako rozmer recipientu $\lambda \approx d$	značne väčšia ako rozmer recipientu $\lambda \geq d$	$\lambda \gg d$
Druh prúdenia plynu	laminárne (viskózne prúdenie)	laminárne (viskózne prúdenie)	molekulárne	molekulárne

Tab.5.1 Rozdelenie vákua podľa ČSN 10 7001 [2]

Tento veľký rozsah tlakov, ktorý sa musí prekonať pri čerpaní, nedovoľuje použitie jediného spôsobu čerpania pre celý rozsah. Preto sa v praxi vákuovej techniky rozdeľuje čerpanie do niekoľkých rozsahov a používa metód vhodných pre každý rozsah.

Princípy jednotlivých vývev môžeme zhrnúť takto:

- a) mechanické vývevy, ktoré čerpajú periodickým zmenšovaním a zväčšovaním pracovného priestoru (piestové a rotačné olejové vývevy)
- b) mechanické vývevy, ktoré prečerpávajú plyn zo strany nízkeho tlaku na stranu tlaku vyššieho pre nemeniacom sa pracovnom priestore (molekulárne a Rootsove vývevy)
- c) vývevy, ktorých čerpací účinok je daný strhávaním molekúl plynu rýchlym prúdom pary (tryskové vývevy)
- d) vývevy, ktorých čerpací účinok je daný v najväčšej miere difúziou molekúl plynu do prúdu pár (difúzne vývevy)
- e) vývevy, ktoré čerpajú absorpciou alebo adsorpciou čiastočne ionizovaných plynov na svojich dokonale čistých vnútorných stenách, ktoré majú prípadne vrstvu getra (ionizačné getrové vývevy)
- f) vývevy, ktoré na základe chemického alebo fyzikálneho pôsobenia pohlcujú niektoré plyny a pary – sorpčné vývevy (zeolity, medenné fólie k odstráneniu olejových pár, aktívne uhlie a podobne.)

5.1 charakteristické vlastnosti vývev

- 1.) **Hraničný (limitný) výstupný tlak alebo minimálna hodnota predvákua.** Týmto názvom sa rozumie tlak, proti ktorému môže výveva pracovať. Čím nižšieho tlaku je potrebné dosiahnuť na strane vysokého vákua, tým nižší musí byť tlak na strane výfukovej (predvákuum). Niektoré typy vývev môžu pracovať priamo proti tlaku ovzdušia (piestové, rotačné), tieto potom využívame k vytvoreniu predvákua pre vývevy difúzne, ktoré vyžadujú veľmi malý protitlak (ortuťové 1333 Pa až 13 Pa). Hraničný výstupný tlak u difúzných vývev býva niekedy nazvaný aj ako predvákuová pevnosť vývevy.
- 2.) **Hraničný tlak.** Je to najnižší tlak, ktorého môže byť dosiahnuté v uzavretej nádobe, pripojenej k danej výveve. Vo všeobecnosti závisí hraničný tlak predovšetkým na hodnote hraničného výstupného tlaku (predvákua). U rotačných vývev je hraničný tlak daný tým, že sa pri každej otáčke malé množstvo vytlačeného plynu vracia

späť do čerpaného priestoru. U difúzných vývev sa pohonná látka (ortuť, olej) dostáva do oblasti s rôznym tlakom. Rozpustnosťou plynu v oleji alebo v ortuti sa časť plynu vracia do čerpaného priestoru a tým sa znemožňuje dosiahnuť ideálneho vákua. Hraničný tlak môže byť ďalej taktiež obmedzený prítomnosťou absorbovaných plynov alebo pár v častiach vývevy, alebo pripojenej aparatury a takisto i náhodnými mikroskopickými netesnosťami. Hraničný tlak u rotačných a difúzných vývev závisí takisto na tlaku par pohonných látok. Tieto pary sa dajú zachytiť v chladičoch (vymrazovačkách).

- 3.) **Kompresný pomer.** Pomer výstupného hraničného tlaku (predvákua) a vstupného hraničného tlaku nazývame kompresným pomerom vývevy. U rotačných vývevách býva tento pomer v rozsahu 10^4 až 10^6 , u difúzných vývevách 10^5 až 10^7 . Jeho hodnota závisí veľmi podstatne na druhu čerpaného plynu, napríklad vodík, mnohonásobne menší ako pre vzduch.
- 4.) **Čerpacia rýchlosť vývevy.** Čerpacia rýchlosť S je definovaná ako objem plynu, ktorý je odčerpávaný z vákuového systému za jednotku času, pri takom tlaku, aký je práve v systéme. Čerpacia rýchlosť býva udávaná v $[l/s]$ alebo v $[m^3/h]$. Čerpacia rýchlosť každej vývevy je v dosť širokom rozsahu viacmenej nezávislá na tlaku, až kým sa nepriblíži k hraničnému tlaku vývevy, kedy sa efektívna čerpacia rýchlosť začína znižovať a pri hraničnom tlaku je efektívna čerpacia rýchlosť nulová.

5.2 Rozdelenie vývev

Ako už bolo spomenuté, na to aby sme dosiahli niektorého stupňa vákua, je ideálne použiť jednu prípadne viacero vývev. V súčasnosti existuje veľké množstvo typov, nehovoriac o prevedení, niektoré typy používané najmä v elektrónových mikroskopoch si popíšeme v nasledujúcich častiach práce.

5.2.1 Mechanické vývevy

5.2.1.1 Vývevy piestové

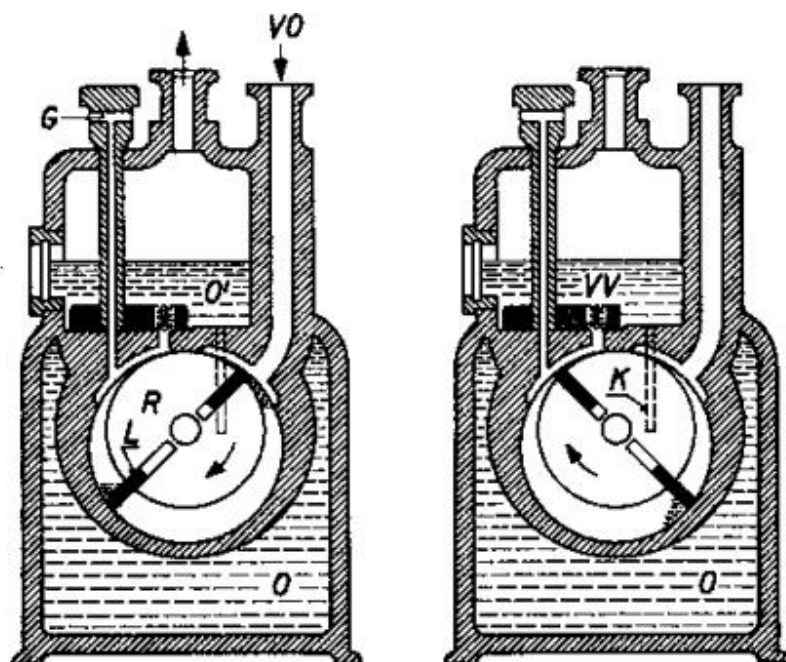
Ako prvé svetlo sveta uzreli piestové vývevy. Princíp ich činnosti závisí na nasiaknutí plynu z vyčerpávaného priestoru do pracovného valca vývevy pomocou pohybu piestu a v následnom vytlačení takto uzavretého plynu do ovzdušia. Princíp je v podstate rovnaký ako napríklad u cyklopumpy. Piestové vývevy sa používali vo vákuovej technike ako vývevy predvákuvé, no postupne boli vytlačené vývevami rotačnými.

5.2.1.2 Rotačné olejové vývevy

Rotačné olejové vývevy sú dnes azda najviac používané predvákuvé vývevy vôbec. Dodnes ich bolo vytvorené niekoľko typov, z ktorých dva si v krátkosti popíšeme.

1.) Vývevy s rotujúcimi krídelkami (typ Gaede)

V tomto prípade úlohu piestu pri nasávaní vzduchu a vyfukovaní plynu nahradili doštičky (krídelka), tvoriace prepážky v drážke otáčajúceho sa valcového bubna. Samotné teleso vývevy má valcovú dutinu, v ktorej je excentricky uložený valec. Tento sa otáča okolo svojej vlastnej osy. Valec má v dvoch pozdĺžnych drážkach uložené dve krídelka, ktoré sú pomocou pružiny pritláčané na vnútornú stenu dutiny. Otáčaním valca sa zväčšuje priestor za krídelkom, tým v ňom vzniká podtlak a vstupným hrdlom sa doňho dostáva vzduch z vyčerpávaného priestoru. Pri ďalšom otáčaní, zakryje druhé krídelko vstupný otvor, čím sa uzatvorí priestor s nasiatym plynom. Následne je plyn hnaný medzi krídelkami k výfukovému otvoru. V okamžiku, keď prvé krídelko výstupný otvor prejde, plyn je vytlačovaný von týmto otvorom pomocou druhého krídelka. Pre zaistenie dokonalého utesnenia miesta dotyku rotujúceho bubna s vnútornou stenou, miesta dotyku krídelko s vnútornou stenou plášťa, sa používa minerálneho oleja ako tesnenie. Obvykle je celý takýto systém vývevy ponorený do oleja. Výhodou je okrem iného aj lepšie chladenie. Čerpacia rýchlosť nebýva príliš vysoká. Hraničný tlak býva obvykle horší ako 10^{-2} torr. Pre dosiahnutie lepšieho vákua sa zapájajú dve vývevy do série – dvojstupňová výveva. Pri tomto systéme je hraničný tlak asi 10^{-3} torr.



Obr. 5.1 Rotačná výveva (L – lopatka(krídello), K- kanálik pre cirkuláciu oleja,O-olejová náplň,R-rotor,VO vstupný otvor, VV – výstupný ventil, G – vypúšťací ventil)[4]

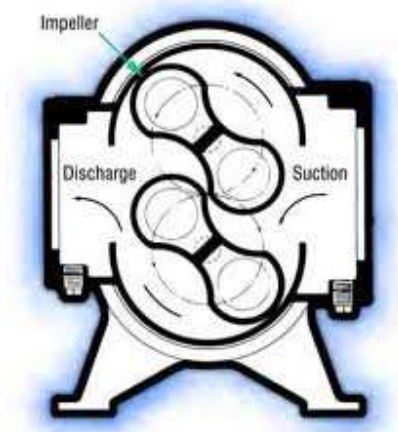
2.) Výveva s rotujúcim excentrickým valcom

Konstruktúra vývevy je veľmi podobná predchádzajúcemu typu. Okolo osi sa otáča výstredný valec, na ktorom je plášť s guľôčkovým ložiskom. Medzi sacím a výfukovým ventilom je tentokrát oddeľujúca prepážka, ktorá je pružinou tlačaná na povrch rotujúceho valca. Plášť rotujúceho valca sa buďto otáča s valcom, alebo sa valí po vnútorných stenách telesa vývevy. Čerpacia rýchlosť je v tomto prípade vyššia ako u vývevy typu Gaede, pretože vzhľadom k menšiemu treniu, môže byť použitá vyššia rýchlosť otáčania. Systém je opäť ponorený do oleja a opäť sa často používa dvojstupňové usporiadanie.

5.2.1.3 Rootsova výveva

Rootsova výveva má uplatnenie v oblasti tlaku 1333 Pa až 0,13 Pa (cca 10 torr až 10^3 torr) a to najmä v prípadoch pre čerpanie veľkých množstiev plynov. Čerpacia rýchlosť rádovo 10000 až 100 000 m³/h. V telese vývevy sa proti sebe otáčajú dva rotory, ktoré majú v priereze tvar osmičiek. Vhodne zvoleným prevodom je dosiahnutá synchronizácia, kedy medzi rotormi je neustále udržiavaná vzdialenosť niekoľkých stotín milimetra. Medzi rotormi

ani medzi stenou a rotorom nedochádza k treniu. Z toho dôvodu sa nepoužíva žiaden olej v pracovnom priestore a výveva môže dosahovať vysokých rýchlostí otáčania. (2000 až 3000 ot/min). Pre vývevu s čerpacou rýchlosťou $1400 \text{ m}^3/\text{h}$ postačí motor s výkonom 1kW.



Obr. 5.2 Rootsova výveva [1]

5.2.2 Molekulárne vývevy

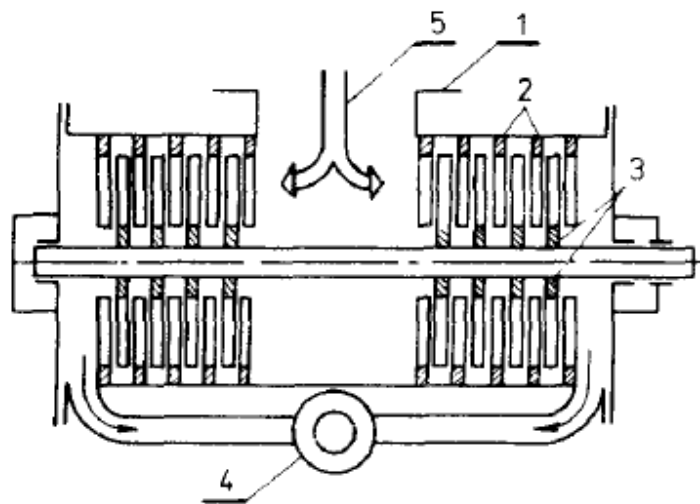
Jedná sa o jediné rotačné vývevy, ktoré sa radia medzi vysokovákuové. K dosiahnutiu vysokého vákua potrebujú predvákuum.

5.2.2.1 Vlastné molekulárne vývevy

Hlavné časti vývevy tvoria valcový stator a rotor. Konštrukcia statora je upravená tak, aby medzi vstupným a výstupným otvorom je medzera tvorená statorom a rotorom veľmi malá. V zvyšnej časti je medzera medzi statorom a rotorom o čosi väčšia. Pri rýchlom otáčaní valca je plyn u otvoru strhávaný povrchom otáčajúceho sa valca smerom od vstupu k výstupu. Rýchlosť otáčania býva 10 000 až 12 000 ot/min. Dosiahnuteľné vákuum $1,33 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (asi 10^{-7} torr). Čerpacia rýchlosť je takisto pomerne dosť vysoká asi $21/\text{s}$ pri tlaku $0,13 \text{ Pa}$. Molekulárna výveva potrebuje veľmi precíznu výrobu, veľkosť štrbiny je v stotinách milimetra a nie je možné pripustiť akúkoľvek nečistotu počas prevádzky.

5.2.2.2 Turbomolekulárna výveva

Konstrukčnou úpravou molekulárnej vývevy najmä v oblasti statora a rotora vznikla tzv. turbomolekulárna výveva. Na statore i rotore sú striedavo upravené kotúče tak, že vzduch je čerpaný od stredu k obidvom stranám vývevy, kde je umiestnená výfuková príruha. Prevádzková bezpečnosť je daná tým, že vzdialenosť medzi jednotlivými kotúčmi je 1mm, čiže podstatne väčšia ako v predchádzajúcej variante. Rotor dosahuje rýchlosti 16 000 ot/min. Čerpacia rýchlosť je 140l/h a je stála až do tlaku $6,67 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Hraničný tlak je až $1,33 \cdot 10^{-7} \text{ Pa}$.



Obr. 5.3 Schéma turbomolekulárnej vývevy [4]

6 TEKUTINA – POJMY A FYZIKÁLNE VLASTNOSTI

Pri riešení hydromechanických úloh sa vychádza z predstavy tekutiny ako spojitého, rovnorodého prostredia (kontinua). Rovnorodosťou alebo izotropiou chápeme rovnaké vlastnosti všetkých častí tekutiny nezávislo na ich polohe alebo smere pôsobenia. Tekutina napríklad plyn, ktorej základom sú molekuly nachádzajúce sa len v diskretných bodoch, molekuly plynu vykonávajú náhodný tepelný pohyb. Dôsledkom tohto pohybu sú vzájomné zrážky molekúl a ich nárazy na stenu nádoby, čo vnímame ako tlak plynu. V hydromechanike sa označuje tekutina, ktorá nemá vnútorné trenie a nie je väzká (viskózna) a súčasne je nestlačiteľná, pojmom ideálna alebo dokonalá tekutina. Toto označenie i keď nevystihuje skutočnosť, dovoľuje jednoduchšie odvodiť niektoré zákonitosti. Ideálna tekutina môže byť namáhaná len tlakom, zatiaľ čo väzká (skutočná) tekutina môže byť popri tom namáhaná aj šmykovou silou. Tekutina je látka, ktorá sa vždy nevratne deformuje, nemá vlastný tvar a za pôsobenia i nepatrných síl sa častice tekutiny ľahko roz pohybujú (výnimku tvoria niektoré neneutronovské tekutiny). [11] , [13]

Rozdelenie tekutín :

Nestlačiteľné – pôsobením tlaku, normálnych síl, len nepatrne menia svoj objem. Patria sem kvapaliny. Malé objemy kvapalín tvoria kvapky. Kvapaliny zaujímajú tvar nádoby, vyplňajú jej spodnú časť a vytvárajú voľnú hladinu.

Stlačiteľné – a teda aj rozpínavé, vyplňujú celý vždy objem nádoby. Podľa toho, či je ich stav blízko alebo ďaleko bodu skvapalnenia, sú to buď pary alebo plyny.

6.1 Fyzikálne vlastnosti tekutín

Veličiny ktoré určujú fyzikálne vlastnosti a s nimi sa v hydromechanike najčastejšie počíta sú tieto.

Merný tlak

V praxi označovaný len ako tlak. Je to pomer elementárnej tlakovej sily dF pôsobiacej kolmo na elementárnu plošku dS .

$$p = \frac{dF}{dS}$$

Hustota

Pomer hmotnosti elementárnej častice tekutiny dm ku jej elementárnemu objemu dV , obklopujúci bod, v ktorom sa hustota určuje.

$$\rho = \frac{dm}{dV}$$

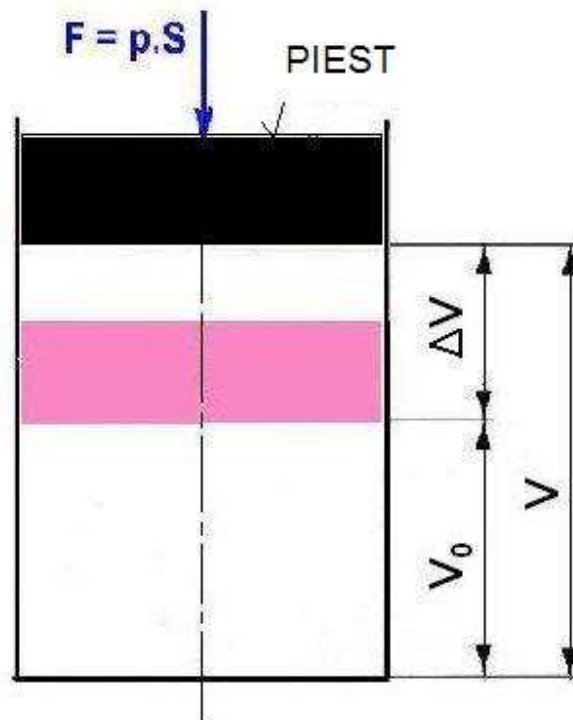
Prevrátená hodnota hustoty je merný objem.

$$V = \frac{1}{\rho} = \frac{dV}{dm}$$

Hustota plynov sa mení s tlakom a teplotou, u kvapalín sa mení len nepatrne, v množstve praktických úloh sa považuje za konštantnú.

Objemová stlačiteľnosť

Je vlastnosť tekutín a telies znižovať svoj objem pri zvyšovaní tlaku (obr.6.1).



Obr. 6.1 Turbulentné a laminárne prúdenie [3]

Podľa obr.6.1 sa zmena objemu vypočíta podľa vzorca

$$V_0 = \left(1 - \frac{\Delta p}{K}\right),$$

Kde K je modul objemovej stlačiteľnosti tekutiny, definovaná vzťahom

$$K = \rho \frac{dp}{d\rho}$$

Pre vodu je modul objemovej rozťažnosti $K=2,1 \cdot 10^9$ Pa.

Teplotná rozťažnosť

Teplotná rozťažnosť tekutín charakterizuje zmenu objemu a hustoty tekutiny v závislosti na zmene teploty. Zmenu objemu je možné určiť

$$V_0 = V(1 + \beta t),$$

kde súčiniteľ objemovej rozťažnosti je určený vzťahom

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_{p=\text{konšt.}}$$

Viskozita tekutín

Viskozita tekutín sa prejavuje pri prúdení skutočných kvapalín. Ak tečie tekutina (plyn alebo kvapalina) pozdĺž rovinatej plochy, ktorá je v pokoji, je vrstvička, ktorá k nej tesne prilieha tiež nehybná, ale ďalšie vrstvičky sa pohybujú tým rýchlejšie, čím sú ďalej od nehybnej plochy.

Sila trenia F, ktorá brzdí relatívny pohyb dvoch k sebe priliehajúcich vrstiev (tj. ich relatívny pohyb) je priamo úmerná veľkosti ich styčnej plochy S a gradientu rýchlosti dv/dr , ktorý medzi nimi existuje. Takto znie Newtonov zákon viskózneho toku, ktorý, je matematicky zapísaný vzťahom

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy},$$

kde η je dynamická viskozita, alebo koeficient viskozity, ktorej rozmer je Pa.s,

$\frac{dv}{dy}$ je gradient rýchlosti v smere kolmom na smer pohybu.

Viskozita kvapalín ovplyvňuje rýchlosť ich tečenia a teda aj objem, ktorý pretečie cez trubicu za jednotku času. Preto jednou z metód merania viskozity je meranie objemu vytečenej kvapaliny.

Okrem dynamickej viskozity η sa často používa kinematická viskozita ν , definovaná vzťahom:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

kde ρ je hustota.

U plynov, ktorých tepelný pohyb molekúl prevláda nad silami medzi-molekulárnymi, narastá so zvyšujúcou sa teplotou rýchlosť tepelného pohybu molekúl, čím rastie i viskozita plynu. U kvapalín je to naopak. U nich sú dominantné medzi-molekulárne sily oproti tepelnému pohybu molekúl, preto u kvapalín klesá viskozita s rastúcou teplotou.

Viskozita kvapalín sa meria viskozimetrami. Najčastejšie používané sú kapilárne, výtokové, prietokové, rotačné a iné. Ako výtokový viskozimeter sa v Európe najčastejšie používa Englerov viskozimeter, ktorý sa vyznačuje vysokou presnosťou a jednoduchosťou merania. Meradlom väzkosti sú Englerove stupne E. Určujú sa ako pomer výtoku τ skúmanej kvapaliny objemu 200cm^3 pri určitej teplote t k výtokovej dobe τ_v vody pri 20°C z toho istého viskozimetra.

$$E = \frac{\tau}{\tau_v}$$

Tlak nasýtených pár

Tlak nasýtených pár je hodnota tlaku pár nad hladinou kvapaliny, kedy nastáva rovnováha medzi počtom molekúl, ktoré kvapalinu opúšťajú a tých, ktoré sa vracajú naspäť. U jednozložkových kvapalín záleží len na teplote a tlak s teplotou aj rastie. Čím je tlak nasýtených pár kvapaliny pre danej teploty vyšší, tým je kvapalina tekavejšia. Tlak nad hladinou kvapaliny musí byť vyšší ako je tlak nasýtených pár, inak by mohlo dôjsť k prudkému odpareniu alebo varu. V prípade, že klesne tlak vo vnútri kvapaliny pod hodnotu tlaku nasýtených pár, nastáva vznik kavitácie.

7 PRÚDENIE PLYNOV

Plyn z vákuového systému sa odčerpáva vývevou buď priamo cez určitý otvor v recipiente, alebo pomocou rúrky rôzneho prierezu a dĺžky. Na začiatku čerpania je vo vákuovom systéme zvyčajne vždy atmosférický tlak, pričom na vstupe vývevy, pri jej činnosti, je tlak nižší. Následkom rozdielu tlakov na výstupe z vákuového systému a na vstupnej strane vývevy, dochádza vo väčšine prípadov k usmerneniu prúdeniu plynu cez spájacie vedenie. Podobný jav môže nastať i v situácii, ak plyn prúdi cez netesnosť v stenách vákuového systému. Vždy je tu rozdiel tlakov medzi atmosférickým a získaným tlakom vo vákuovom systéme. Silou, ktorá spôsobuje prúdenia je vo väčšine prípadov rozdiel tlakov. Rôzne experimenty však poukazujú na to, že množstvo plynu, ktoré rúrkou prúdi, cez jednotkový prierez a za jednotku času, závisí od rôznych ďalších podmienok. Tieto sú najmä stredný tlak a trenie plynu o steny rúrky, viskozity a podobne. Pri opise charakteru prúdenia plynov je často využívaná analógia s prúdením kvapalín.

Rozlišujeme tri hlavné typy prúdenia a to v závislosti od usmernenej rýchlosti (ktorú získavajú molekuly plynu následkom gradientu tlaku), ďalej uvažovaním vnútorného trenia v plyne, sily trenia o steny potrubia a zrážok molekúl navzájom i o steny potrubia (charakterizované závislosťou medzi λ a priemerom potrubia d). Tieto typy prúdenia sú :

- turbulentné alebo vírivé,
- laminárne alebo viskózne,
- molekulárne.

Prechod prúdenia od jedného typu k druhému nie je samozrejme skokový, ale postupný. Existujú však určité podmienky, za ktorých prevláda len jeden z týchto typov prúdenia. Vo vákuových systémoch sa najčastejšie stretávame s poslednými dvoma typmi prúdenia, resp. s prechodovým prúdením medzi nimi, viskózne-molekulárnym prúdením.

7.1 Turbulentné prúdenie

Turbulentné prúdenie je vo vákuových zariadeniach dosť vzácny prípad, ale dochádza k nemu vždy, keď sa čerpá vývevou s veľkou čerpacou rýchlosťou cez úzke rúrky – kapiláry, z atmosférického tlaku pri veľkom spáde tlaku.

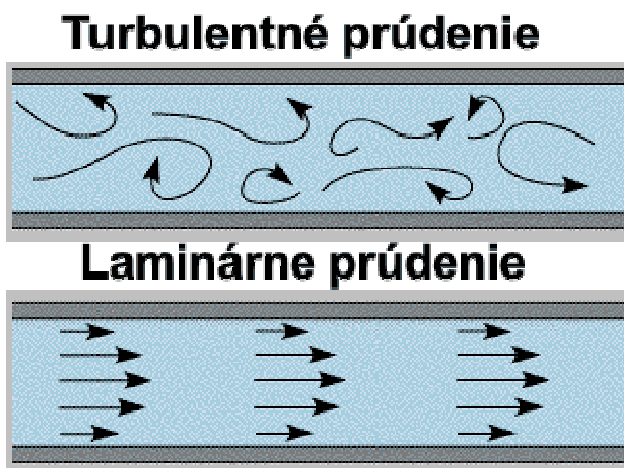
Príkladom turbulentného prúdenia je prúdenie vody v rieke alebo prúdenie vzduchu pri vetre. Pri turbulentnom prúdení reálna kvapalina „spotrebúva“ časť svojej energie na vytváranie vírov, čím sa celková rýchlosť prúdenia znižuje a prietok kvapaliny nie je stály. V oblastiach vírov dochádza ku zvyšovaniu rýchlosti prúdenia kvapaliny a k poklesu tlaku.[3]

Prechod medzi turbulentným a laminárnym prúdením sa posudzuje podľa veľkosti Reynoldsovo čísla, kde ale neexistuje ostrá hranica medzi týmito prúdeniami. Reynoldsovo číslo fyzikálne vyjadruje pomer prác síl zrýchlenia k práci síl trenia a má pre valcové potrubie tvar

$$Re = \frac{du\rho}{\eta}$$

kde u je usmernená rýchlosť plynu vzhľadom na rúrku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], d priemer rúrky [m], ρ hustota plynu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] a η koeficient dynamickej viskozity [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

Ak je uvedené číslo väčšie ako 2 200, v rúrke prevláda turbulentné prúdenie a ak je menšie ako 1 200, v rúrke je laminárne prúdenie.



Obr. 7.1 Turbulentné a laminárne prúdenie [3]

7.2 VISKÓZNE (LAMINÁRNE) PRÚDENIE

Prúdenie dlhou trubicou. O viskóznom alebo laminárnom prúdení plynu hovoríme vtedy, ak si prúdenie môžeme predstaviť v tvare súosových valcových vrstiev, pohybujúcich sa určitou rýchlosťou a kedy stredná voľná dráha častíc je oveľa menšia ako charakteristický rozmer rúrky, cez ktorú plyn prúdi. Pri týchto podmienkach, pri nízkom tlaku plynu prevláda usmernený makroskopický pohyb molekúl plynu spôsobený gradientom tlaku v rúrke nad chaotickým tepelným pohybom. V týchto podmienkach počet vzájomných zrážok medzi molekulami prevláda nad počtom zrážok molekúl so stenami trubice. Pri vzájomných zrážkach molekúl dochádza k vzájomnej výmene energie, čo však nevyvoláva zmenu strednej rýchlosti molekúl. Ale pri zrážkach molekúl so stenami trubice strácajú tieto úplne svoju energiu usmerneného pohybu, takže aj ich usmernená rýchlosť je nulová. Výsledkom tohto procesu je určité rozdelenie usmernenej rýchlosti molekúl plynu v priečnom priereze trubice. Príkladom laminárneho prúdenia je nosom vdychovaný vzduch a krv vo vlásočniciach nášho tela.[3], [8]

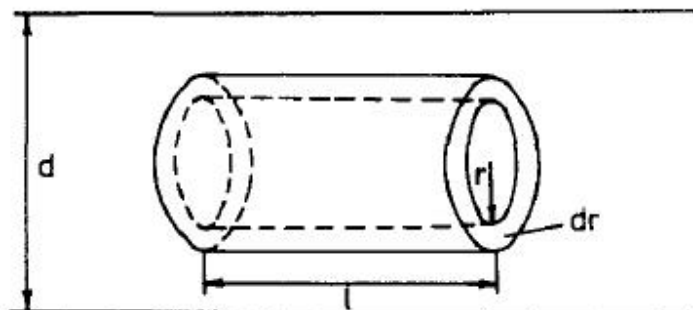
Uvažujme nekonečne dlhú valcovú trubicu s priemerom d , v ktorej si vyberieme valcovú vrstvu plynu s polomerom r až $r + dr$ s dĺžkou l , ako to vidno na obr. 7.2. Na koncoch tejto vrstvy sú rôzne tlaky p_1 a p_2 , čo vyvoláva prúdenie plynu následkom pôsobenia sily ak $p_2 > p_1$.

$$f_p = 2\pi dr(p_2 - p_1)$$

Na túto vrstvu pôsobia sily trenia od susedných vrstiev. Vrstva z vnútornej strany urýchľuje pohyb a je daná vzťahom

$$f_{vnút} = 2\pi r \ln \frac{du}{dr}$$

kde du/dr je gradient usmernenej rýchlosti plynu v smere polomeru.



Obr. 7.2 Laminárne vrstvy vo valcovej trubici

Ďalšie spomalenie pohybu našej vrstvy je spôsobené vrstvou z vonkajšej strany, za predpokladu, že rýchlosť plynu je na stenách trubice nulová. Táto sila je vyjadrená vzťahom

$$f_{vnút} = -2\pi(r + dr)l\eta \frac{du}{dr} + \frac{d^2u}{dr^2} dr$$

Výslednica síl trenia je napokon v stacionárnom stave rovná sile rozdielu tlakov

$$f_{vonk} + f_{vnút} = f_p$$

Dosadením, úpravou a vynechaním malých členov vyšších rádov dostaneme

$$l\eta \left(\frac{du}{dr} dr + \frac{d^2u}{dr^2} dr \right) = -rdr(p_2 - p_1)$$

Z čoho úpravou

$$d\left(r \frac{du}{dr}\right) = \frac{p_2 - p_1}{l\eta} r dr$$

Integráciou postupne dostaneme

$$r \frac{du}{dr} = \frac{p_2 - p_1}{2l\eta} r^2 + B_1$$

$$u = -\frac{p_2 - p_1}{4l\eta} r^2 + B_1 \ln r + B_2$$

Integračné konštanty B_1 a B_2 určíme z okrajových podmienok. Ako určite vieme, na osi trubice (kde $r = 0$) je vždy konečná rýchlosť, musí sa $B_1 = 0$ (pretože $\ln 0 = -\infty$). Na stenách trubice (kde $r = d/2$) je rýchlosť nulová. Pre integračnú konštantu B_2 teda platí

$$B_2 = \frac{p_2 - p_1}{16l\eta} d^2$$

Následným dosadením do vzťahu (3.28) dostaneme konečne riešenie pre usmernení rýchlosť prúdenia plynu valcovej vrstvy v tvare

$$u = \frac{p_2 - p_1}{4l\eta} \left(\frac{d^2}{4} - r^2 \right)$$

Celkový objem plynu, ktorý pretečie za jednotku času cez prierez trubice, dostaneme integráciou elementárnych objemov plynu prúdiacich cez uvažované valcové vrstvy. Takže platí

$$V = \int_0^{d/2} u 2\pi r dr = \frac{\pi d^4}{128\eta l} (p_2 - p_1)$$

čo je *Poiseuillov vzťah* odvodený pre laminárne prúdenie nestlačiteľných kvapalín. Pri štúdiu prúdenia plynu je výhodnejšie poznať prietok plynu, ktorý dostaneme, ak vynásobíme elementárny objem plynu hodnotou tlaku p úseku trubice dl , na ktorom je tlakový spád dp

$$dV = \frac{\pi d^4}{128\eta l} dp$$

Z čoho

$$dq = p dV = \frac{\pi d^4}{128\eta l} p dp$$

A integráciou cez tlakový rozdiel dostávame

$$q = \frac{\pi d^4}{128\eta l} \int_{p_1}^{p_2} p dp = \frac{\pi d^4}{256\eta l} (p_2^2 - p_1^2) = C(p_2 - p_1)$$

Z čoho pre vodivosť dlhej valcovej rúrky dostávame hodnotu

$$C = \frac{\pi d^4}{256\eta l} (p_1 + p_2)$$

Z čoho vyplýva, že vodivosť rúrky pri laminárnom prúdení plynu závisí nielen od geometrických rozmerov potrubia a koeficientu viskozity η , ale aj od priemerného tlaku v potrubí.

Pre vzduch pri teplote 20 °C sa $\eta = 18,15 \cdot 10^{-6}$ Pa·s, z čoho pre vodivosť rúrky s priemerom d dostaneme

$$C = 6,75 \cdot 10^2 \frac{d^4}{l} (p_1 + p_2) \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] [2]$$

7.2.1 Prúdenie cez otvor

Prúdením plynu cez otvor z oblasti 1, kde je tlak plynu p_1 do oblasti 2 s tlakom $p_2 < p_1$ s poklesom tlaku p_2 sa zvyšuje rýchlosť i prietok vytekajúceho plynu. Rýchlosť výtoku plynu, respektíve je narastanie je zhora ohraničené rýchlosťou zvuku v uvažovanom plyne. Tento jav

nastane pri určitom kritickom pomere p_2/p_1 a ďalšie znižovanie tlaku p_2 už nevyvoláva zvýšenie prietoku plynu

Prietok plynu možno vyjadriť v tvare

$$q = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{kT_1}{m}} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} p_1 A$$

kde $\kappa = c_p/c_v$ je pomer hmotnostnej tepelnej kapacity pri konštantnom tlaku a pri konštantnom objeme, T_1 – teplota v oblasti 1, m – hmotnosť molekuly a A – plocha otvoru.

Pre vzduch pri 20 °C ($\kappa = 1,403$, $T_1 = 293$ K) je

$$q = 774 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0,713} \sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{0,288}} p_1 A \text{ [Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Ak p je v Pa a A je v m^2

Maximálnu hodnotu q dostaneme pre kritický tlak

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{krit} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

A teraz v prípade vzduchu

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{krit} = 0,525$$

Vodivosť otvoru pre vzduch pri 20 °C potom môžeme spočítať pre niekoľko hodnôt pomerov p_2/p_1 .

1.) Ak

$$1 \geq \frac{p_2}{p_1} \geq \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{krit} = 0,525$$

Potom

$$C = \frac{q}{p_1 - p_2} = 774 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0,713} \sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{0,288}} \frac{A}{1 - \frac{p_2}{p_1}} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

3.) ak

$$\frac{p_2}{p_1} \leq \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{krit} = 0,525$$

Potom

$$C \approx \frac{200A}{1 - \frac{p_2}{p_1}} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

4.) ak

$$p_2 / p_1 \leq 0,1 \quad C \approx 200A [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Z uvedených vzťahov vyplýva, že vodivosť otvoru je funkciou pomeru p_2/p_1 , pokiaľ tento pomer nie je menší ako 0,1. [2]

7.3 MOLEKULÁRNE PRÚDENIE

Ak sa podmienky pri prúdeň zmenia tak, že v nejakom mieste trubice tlak klesne pod určitú hodnotu, nastáva situácia, kedy stredná voľná dráha molekúl plynu bude značne väčšia ako pričný rozmer trubice. Tým nastáva zníženie vplyvu vnútorného trenia v plyne a charakter prúdeň sa zásadne zmení. Takéto prúdeň nazývame molekulárne prúdeň. Teraz začnú prevládať zrážky molekúl so stenami trubice namiesto vzájomných zrážok molekúl. Molekuly sa budú pohybovať nezávisle jedna od druhej. Tento jav má zaujímavé následky ako to vidno z nasledujúceho príkladu, ktorý veľmi dobre vystihuje podstatu molekulárneho prúdeň.

Budeme skúmať dve veľké nádoby spojené medzi sebou trubicou s priemerom d a dĺžkou l . Nech v jednej nádobe je kyslík hneď na začiatku a v druhej vodík, pričom tlak kyslíka je dvojnásobne vyšší ako tlak vodíka. Po spojení nádob by mal začať prúdiť kyslík do nádoby s vodíkom. Toto však nastane len v prípade laminárneho prúdeň. Keďže pohyby molekúl sú pri molekulárnom prúdeň nezávislé, počet molekúl dopadajúcich na jednotku plochy je daný výrazom (a) t. j. $n^{-1/4}$. Zo začiatkových tlakových podmienok ďalej vieme, že koncentrácia molekúl kyslíka je dvakrát vyššia ako koncentrácia

molekúl vodíka. Za predpokladu, že teplota v obidvoch nádobách je rovnaká, potom je rovnaká aj kinetická energia postupného pohybu molekúl kyslíka i vodíka. Hmotnosť molekuly kyslíka je 16-krát vyššia ako hmotnosť molekuly vodíka, následkom čoho pri zachovaní rovnosti kinetickej energie vyplýva, že rýchlosť molekuly vodíka je štyrikrát väčšia ako rýchlosť molekuly kyslíka. Pre počet dopadajúcich molekúl jednotlivých plynov na jednotku plochy platí

$$j_d = -D \frac{dn_{ab}}{dx} \quad (a)$$

$$\frac{1}{4} n_{O_2} \bar{v}_{O_2} = \frac{1}{4} 2 n_{H_2} \frac{1}{4} \bar{v}_{H_2} = \frac{1}{2} \frac{1}{4} n_{H_2} \bar{v}_{H_2}$$

Z tohto je vidieť, že počet dopadajúcich molekúl kyslíka je len polovičný z dopadajúceho počtu molekúl vodíka. Čiže celkový tlak v nádobe s kyslíkom sa bude spočiatku zvyšovať a tlak v nádobe s vodíkom naďalej znižovať, až kým nenastane vzájomné premiešanie molekúl a a tým aj vyrovnanie celkových tlakov. Pre účely vákuovej techniky je veľmi dobre a často aj potrebné poznať množstvo preprúdeného plynu cez určitý otvor alebo trubicu, ak na ich koncoch existuje určitý rozdiel tlakov. Toto množstvo plynu nám charakterizuje vodivosť.

7.3.1 Prúdenie cez otvor

Opäť predpokladajme, že máme dva objemy, v ktorých sú tlaky plynu p_1 a p_2 spojené určitým otvorom plochy A . Určíme počet molekúl, ktorý prejde cez otvor za jednotku času. Z prvého objemu dopadne na otvor za jednotku času počet molekúl

$$J_1 = \frac{1}{4} n_1 \bar{v} A$$

Z druhého objemu dopadne počet molekúl

$$J_2 = \frac{1}{4} n_2 \bar{v} A$$

Rozdielom tokov z obidvoch objemov získame výsledný prúd molekúl

$$\Delta J = J_1 - J_2 = \frac{1}{4} (n_1 - n_2) \bar{v} A = n_1 \frac{1}{4} (p_1 - p_2) \frac{\bar{v} A}{kT} \quad (c)$$

Stavová rovnica ideálneho plynu

$$pV = NkT = G \quad (b)$$

S použitím stavovej rovnice ideálneho plynu (b) môžeme pre časovú zmenu množstva plynu písať

$$\frac{dpV}{dt} = \frac{dN}{dt} kT = \Delta J kT$$

Dosadením za zmenu toku častíc z výrazu (c) dostaneme pre prúd plynu q vzťah

$$q = \frac{dpV}{dt} = \Delta J kT = \frac{1}{4} (p_1 - p_2) \frac{\bar{v}A}{kT}$$

Z tohoto pre vodivosť otvoru platí

$$C = \frac{q}{p_1 - p_2} = \frac{1}{4} \bar{v}A = \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} A$$

Z daného výrazu nám vyplýva, že vodivosť otvoru pre určitý plyn je úmerná ploche otvoru, odmocnine z absolútnej hodnoty teploty a nepriamo úmerná odmocnine z hmotnosti molekuly plynu.

Pre vzduch pri 20 °C je vodivosť otvoru

$$C = 116A \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

Prípadne pre kruhový otvor s priemerom d

$$C = 91d^2 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

7.4 Nestlačiteľné a stlačiteľné prúdenie

Prúdenie skutočných kvapalín klasifikujeme ako stlačiteľné alebo nestlačiteľné prúdenie, kde sa v prípade prúdenia tekutiny používa Machovo číslo pre hodnotenie stlačiteľnosti, ktoré je definované vzťahom

$$M = \frac{v}{c},$$

kde v je rýchlosť tekutiny a c je rýchlosť zvuku.

Ďalej pre rýchlosť zvuku v ideálnom plyne platí

$$c = \sqrt{\kappa R T} ,$$

kde T je teplota plynu, r všeobecná plynová konštanta, κ je Poissonova konštanta, ktorá udáva pomer merných tepelných kapacít za stáleho tlaku a objemu. Pre ňu platí vzorec

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Pokiaľ sa neprejaví na prebiehajúcom prúde zmena hustoty plynu a súčasne platí pre hodnotu Machovho čísla vhodne volené nerovnosť, prúdenie považujeme prakticky za nestlačiteľné.

$$M \leq (0,2 - 0,3)$$

V prípade, že je nerovnosť splnená, považujeme i prúdenie plynu za prúdenie nestlačiteľnej tekutiny, kvapaliny. Hustota plynu ρ je pre výpočty považovaná za konštantnú a určuje sa z počiatočných podmienok.

V prípade, že je nerovnosť nespĺnená, považujeme i prúdenie plynu za prúdenie stlačiteľnej tekutiny. Hustota plynu ρ je v tomto prípade pri výpočte premenná a vyhovuje rovnici stavu ideálneho plynu v tvare

$$p = R \rho T$$

Prúdenie stlačiteľnej tekutiny môže byť ďalej klasifikované ako prúdenie podzvukové alebo nadzvukové, kde je kritériom už spomínaná hodnota Machovho čísla M . Pri hodnote Machovho čísla $M_{kr} = 1$ hovoríme o kritickom prúde.

Pre prípad jednorozmerného spojitého prúdenia ideálneho plynu v trubici premenného prietokového prierezu A sú rozhodujúce pre určovacie veličiny stavu prúdu tekutiny rýchlosť v , tlak p , hustotu ρ a teplotu T parametrické závislosti na Machovom čísle M a Poissonovej konštante κ

$$\frac{A}{A_{kr}} = \frac{1}{M} \left[\frac{2}{\kappa + 1} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}} ,$$

$$\frac{v}{v_{kr}} = \frac{M}{\left[\frac{2}{\kappa+1} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}}} ,$$

$$\frac{p}{p_{kr}} = \frac{1}{\left[\frac{2}{\kappa+1} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}} ,$$

$$\frac{\rho}{\rho_{kr}} = \frac{1}{\left[\frac{2}{\kappa+1} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{1}{\kappa-1}}} ,$$

$$\frac{T}{T_{kr}} = \frac{1}{\left[\frac{2}{\kappa+1} \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]} .$$

V trubici premenného prierezu, kde uvažujeme jednorozmerné spojité prúdenie, definujeme nasledujúce tri charakteristické stavy prúdenia.

- Stav celkový (zbrzdzenie) $v_0 = 0, p_0, \rho_0, T_0, M_0 = 0$.
- Stav kritický $v_{kr}, p_{kr}, \rho_{kr}, T_{kr}, M_{kr} = 1$.
- Stav limitný $v_m, p_m = 0, \rho_m = 0, T_m = 0, M_m = \infty$.

Z rozboru týchto charakteristických stavov prúdenia, vyplývajú významné pomery charakteristických veličín v jednotlivých stavov, čiže v stave celkovom, kritickom a limitnom

$$\frac{p_0}{p_{kr}} = \left(\frac{\kappa+1}{2} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} ,$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_{kr}} = \left(\frac{\kappa+1}{2} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} ,$$

$$\frac{T_0}{T_{kr}} = \frac{\kappa+1}{2} ,$$

$$\frac{v_m}{v_{kr}} = \left(\frac{\kappa+1}{\kappa-1} \right)^{\frac{1}{2}} .$$

Z rozboru rovníc popisujúcich jednorozmerné spojité prúdenie ideálneho plynu v trubici premenného prierezu vyplýva dôležitý záver: „Zmenšovanie prietochného prierezu vedie prúdiaci plyn k jeho kritickému stavu, a naopak zväčšovanie prietochného prierezu prúdiaci plyn od jeho kritického stavu oddaľuje.“

K tomu, aby sme dosiahli nadzvukového prúdenia v trubici premenného prierezu, je potreba, aby sme v podzvukovom prúde najprv prierez trubice zmenšovali až po kritický stav, po dosiahnutí kritického stavu prúdenia začať prierez trubice zväčšovať, aby sa v trubici podarilo dosiahnuť nadzvukového prúdenia (tvarovanie Lavalovej dýzy, konvergentná a divergentná dýza).

V prípade konvergentnej dýzy(zužujúca sa trubica) je možné na výstupe z dýzy dosiahnuť zníženie tlaku v prúde plynu len na hodnotu kritického tlaku. V prípade, že k dispozícii vyšší tlakový spád, podľa okrajových podmienok, nastáva a výstupom v minimálnom priereze trubice neriadenia expanzia v rozširujúcom sa lúči prúdu plynu z kritického tlaku na tlak okolitého prostredia(plní sa okrajová podmienka).[10],[12]

8 SYSTÉMY VYUŽÍVANÉ PRI RIEŠENÍ PROBLÉMU

8.1 SolidWorks

Model mikroskopu bol vytvorený v systéme SolidWorks. Je to parametrický 3D modelár, ktorý ponúka výkonné objemové i plošné modelovanie, postavené na jadre Parasolid®, automatické generovanie výrobných výkresov a najmä prácu s neobmedzene rozsiahlymi zostavami.

SolidWorks ponúka celú paletu nástrojov, a to od základných, špecializovaných až po rozširujúce nástroje. Patria sem elementárne nástroje pre vytváranie objemových tiel a plôch, nástroje pre analýzu (úkosí, podrezanie, krivosť, uhlové odchýlky a iné), produktívne nástroje (pole zrkadlenia prvkov, komponentov, dielov, variantné modelovanie včetně tabuliek variant, automatické a pokročilé tvarové funkcie, podpora prechodu z 2D do 3D, knižnice materiálov, realistické zobrazenie atď.) a v neposlednej rade sú tu špecializované návrhárske nástroje.

Systém umožňuje veľmi vysoký výkon ako štandard a to za použitia bežného hardwaru, čiže pre prácu so SolidWorks nie je potrebné zaistiť pracovné stanice za desaťtisíce korún.

SolidWorks ponúka výkon pre rýchlu a jednoduchú prácu s veľkými zostavami o desaťtisícoch komponentov a to hlavne bez nutnosti načítať všetky tieto komponenty do pamäti. Pri práci v zostave sa priamo odkazuje na ostatné komponenty, spravuje väzby, vytvára nové a upravuje už vytvorené komponenty.

Skutočná sila SolidWorks vynikne najmä pri práci s veľkými zostavami, hlavne pri vytváraní výkresov z takýchto obrovských zostáv. V týchto výkresoch vznikajú všetky pohľady celkom automaticky, rovnako ako napríklad pri vytváraní kusovníkov.

K dispozícii sú intuitívne a pomerne ľahko zvládnuteľné modelovacie nástroje. Modely je možno vytvárať pomocou vysunutia, rotácie, spojenia profilov, ťahanie po krivkách a mnoho iných. Je tu možnosť využiť všetkých výhod práce vo viactelovom prostredí, vrátane boolevských operácií, posúvania, kopírovania, polí a ďalších.

SolidWorks obsahuje nástroje pre kinematiku, či už dynamickú alebo statickú detekciu kolízií, kinematické väzby či pohybové simulácie.

V SolidWorks je stále zaistená 100% asociatívnosť, čiže akákoľvek zmena výkresa sa ihneď automaticky premietne do modelu jednotlivých dielov, alebo zostavy. Okrem toho, všetky dáta vytvorené v tomto systéme sú vždy plne editovateľné a asociatívnosť je vždy zaručená medzi všetkými dokumentmi SolidWorks, ako sú diely, zostavy či výkresy.

8.2 Cosmos FloWorks

Analýza prúdenia pomocou tejto aplikácie zaistuje spoľahlivosť návrhu zahrňujúcich prúdení plynov, kvapalín alebo prenos tepla (CFD). COSMOSFloWorks ponúka za prijateľnú cenu robustnosť a nástroje high-end CFD systémov pri súčasnom zachovaní jednoduchého a intuitívneho ovládania. Narozdiel od väčšiny konkurenčných produktov COSMOSFloworks kombinuje veľmi pokročilú funkcionálnosť s presnosťou výpočtov, rýchlosťou a jednoduchým užívateľským rozhraním a to najmä vďaka možnosti plnej integrácie do SolidWorks.

Pre jeho vysokú flexibilitu je možné COSMOSFlowWorks využiť v širokej škále rozdielnych aplikácií. Súčasne jeho úzka zviazanosť s CAD, jednoduché ovládanie a rýchla automatická generácia výpočtovej siete umožňujú operatívne zmeny geometrie modelu a overenie ich vplyvu na chod zariadenia.

Možnosti programu:

- Laminárne a turbulentné prúdenie podľa modelu
- Nestlačiteľné a stlačiteľné, podzvukové i nadzvukové prúdenie kvapalín a plynov
- Prenos tepla kondikciou, konvekciou a radiáciou
- Stacionárne a nestacionárne prúdenie
- Vnútorné a vonkajšie prúdenie
- Započítavanie drsností stien
- Model rotácie MRF
- Nahradenie častí modelov poréznymi médiami
- Neneutronovské kvapaliny ako napríklad krv, či pasta
- Zooming – detailný výpočet vybranej časti s okrajovými podmienkami učenými výpočtom na zjednodušenom komplexnom modeli
- A mnoho ďalších

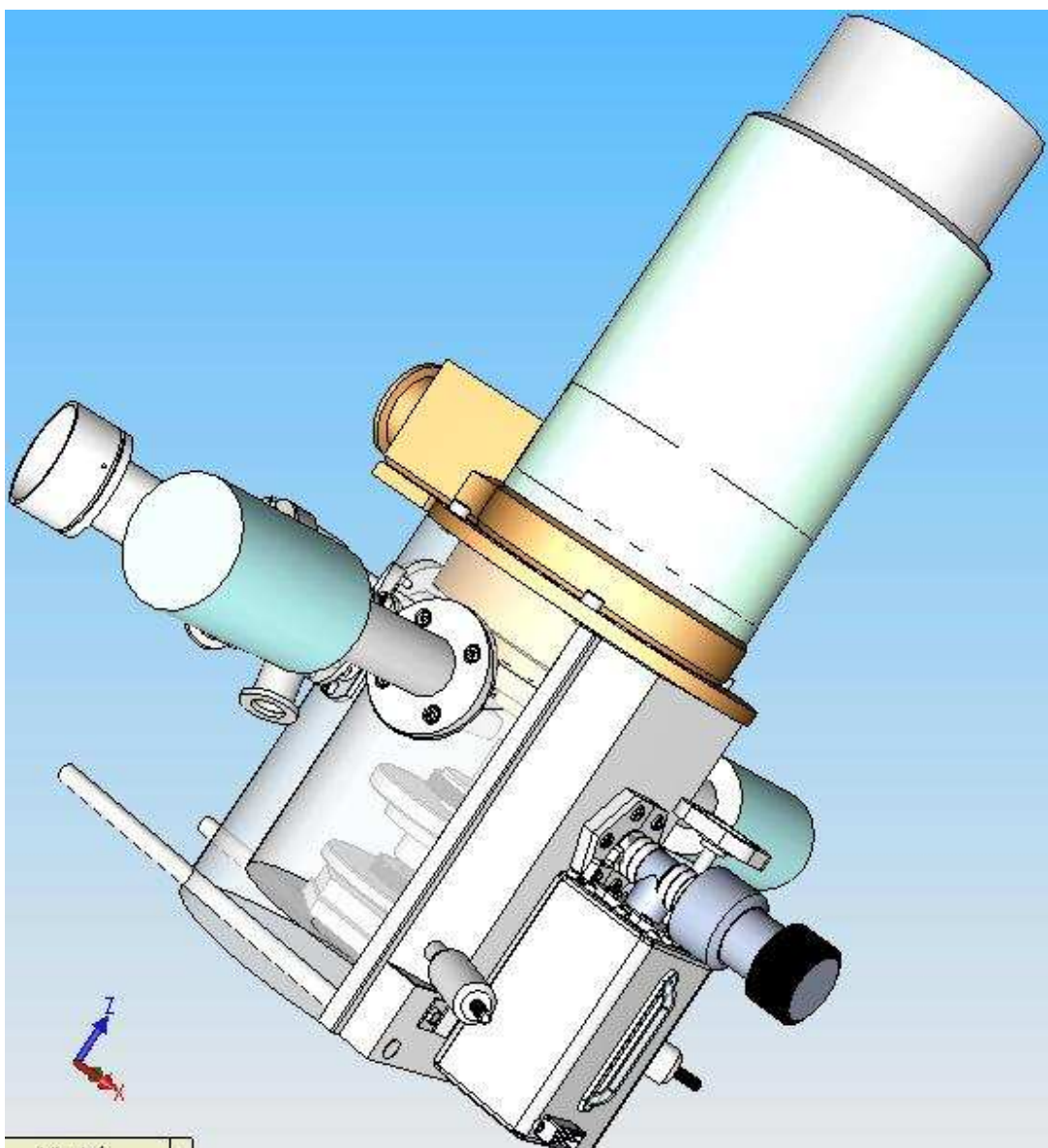
9 POPIS RIEŠENÉHO PROJEKTU

V tejto časti práce je popísaný problém čerpania plynu pre vytvorenie vákua v niektorých častiach environmentálneho rastrovacieho elektrónového mikroskopu AQUASEM II, ktorý bol popisovaný v predchádzajúcich kapitolách. Práca je zameraná najmä na časť mikroskopu, ktorou je detektor sekundárnych elektrónov.

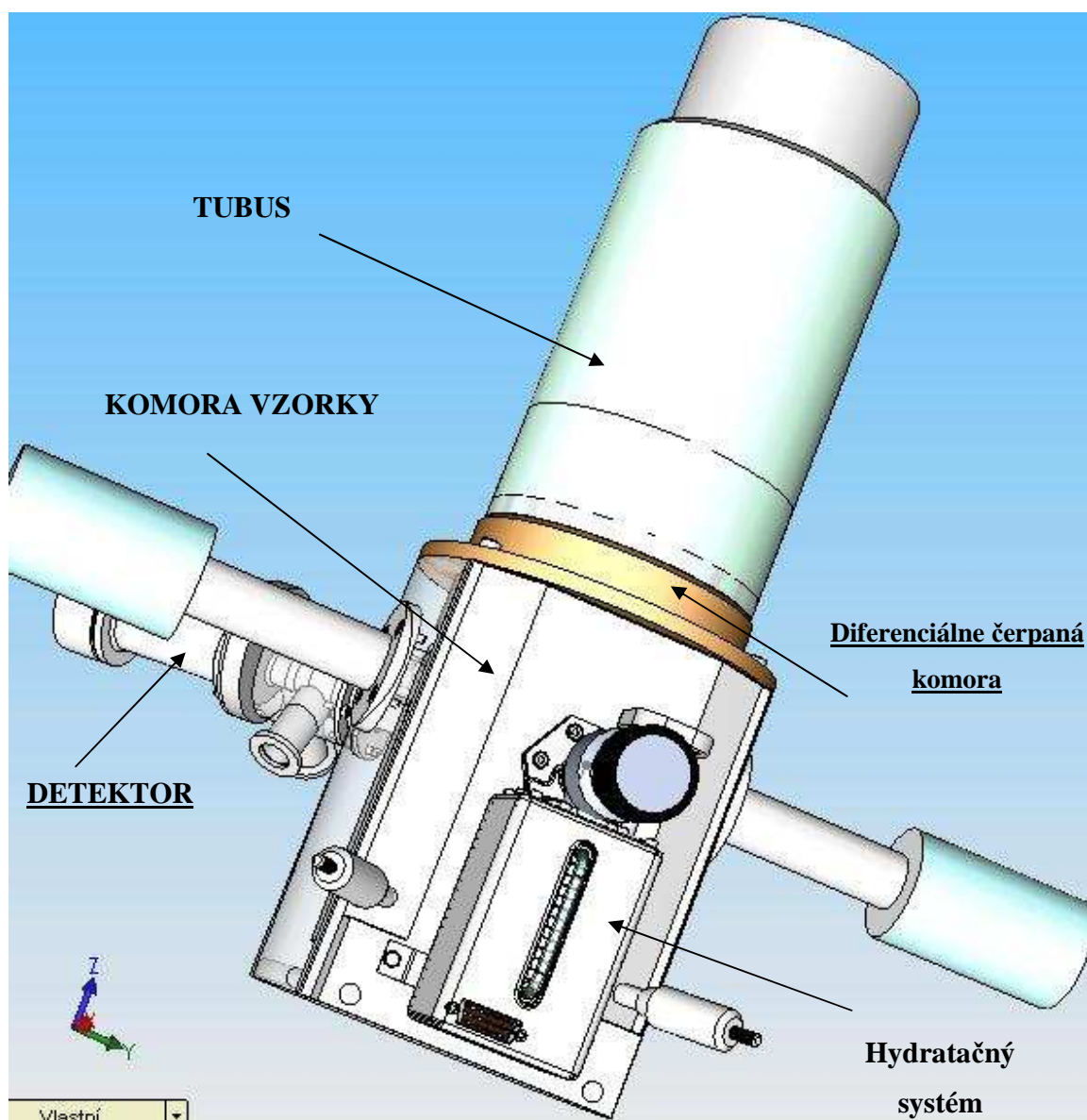
Hlavne v oblasti problematiky čerpania plynu. Aby v dráhe letiacich elektrónov bol čo najnižší tlak, čiže aby v dráhe letiacich elektrónov bolo čo možno najmenej molekúl plynu, a aby tým pádom dochádzalo k pokiaľ možno čo najmenšiemu počtu zrážok elektrónov s týmito molekulami, je potrebné takéto zariadenie správne koncepčne navrhnuť.

V uvedenom zariadení bude cieľom riešenia analýza tlakových podmienok v priestore dráhy elektrónov prechádzajúcich detektorom. Jedná sa o zväzok sekundárnych elektrónov, prechádzajúci detektorom a ktorý vyžaduje minimálny počet zrážok s molekulami vzduchu, v ideálnom prípade by to bol nulový počet zrážok, no v súčasnosti nereálne.

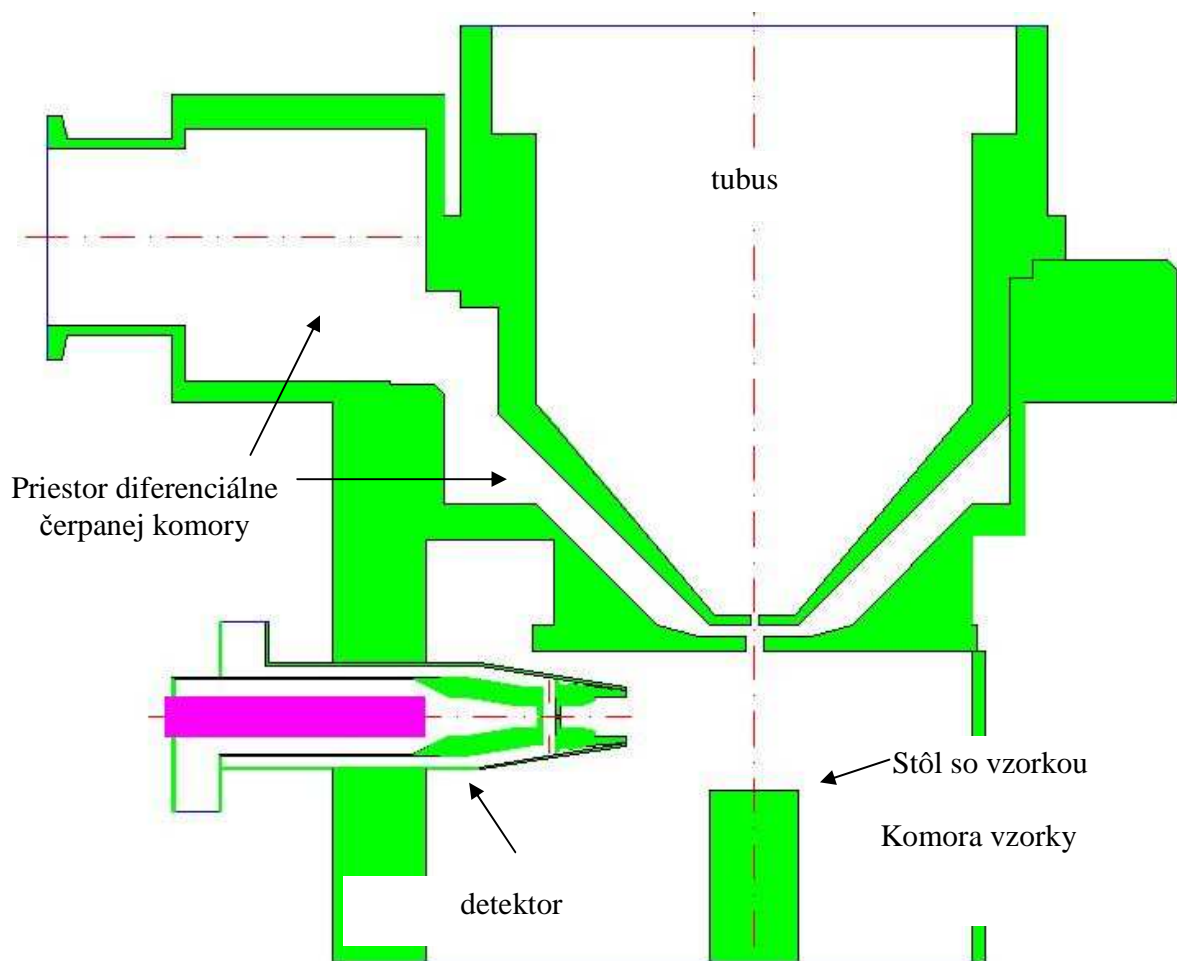
Pohľad na model spomínaného mikroskopu vytvorený v CAD systéme SolidWorks je na obr.9.1 a 9.2 a schematicky na obr.9.3.



Obr. 9.1 Enviromentálny rastrovací elektronový mikroskop AQUASEM II.[7]



Obr. 9.2 Elektronový mikroskop AQUASEM II – popis projektu[7]

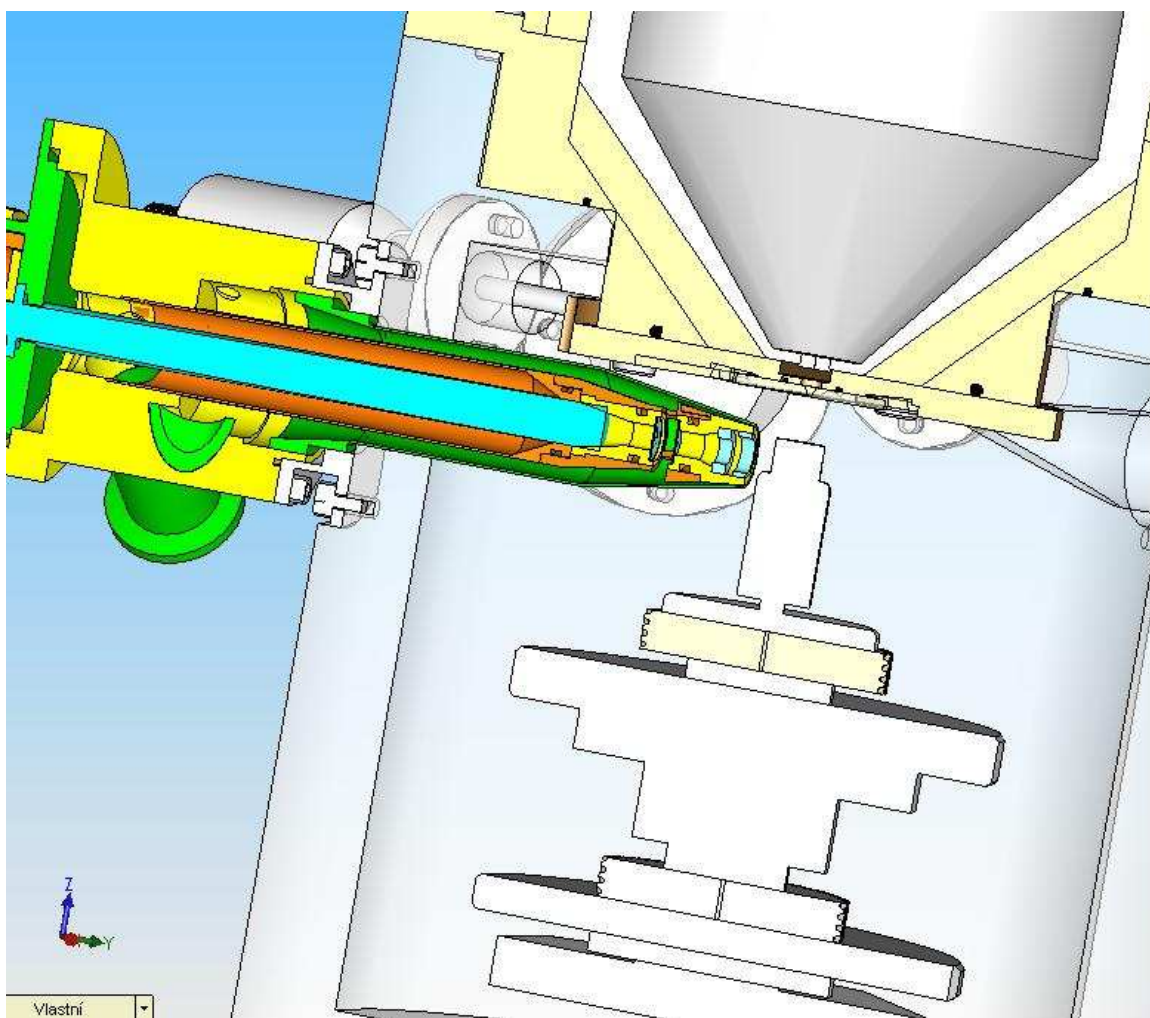


Obr. 9.3 Elektrónový mikroskop AQUASEM II – schéma projektu[7]

Rez daným mikroskopom je na obrázkoch 9.4 a 9.5. V tejto chvíli si vďaka nemu môžeme popísať najdôležitejšie časti mikroskopu. Rez je vedený cez tubus, diferenciálne čerpanú komoru, detektor a komoru vzorky a to vhodným spôsobom, aby bolo možné naznačiť dráhu primárneho zväzku elektrónov a dráhu sekundárnych elektrónov.

- Červenou farbou je naznačená dráha primárneho zväzku elektrónov, ktorý vychádza z tubusu, prechádza diferenciálne čerpanou komorou a vstupuje do komory vzorky, kde zároveň aj končí na vzorke umiestnenej na stole.
- Modrou farbou je naznačená dráha sekundárnych elektrónov, ktoré letia od vzorky do detektora.

Ako už bolo spomenuté, problém tvorí to, že elektrónový zväzok nemôže prechádzať plynným prostredím, pretože zrážky s voľnými molekulami vzduchu zväzok rozptyľujú. Z tohoto dôvodu je v tubuse, z ktorého zväzok vychádza, tlak len 0,01 Pa. Podobná situácia je v detektore u scintilátora, kde musí byť tlak nižší ako 8 Pa, aby nedochádzalo k elektrickým výbojom. Podrobnejšie to bude rozobrané neskôr.



Obr. 9.4 Rez Enviromentálnym rastrovacím elektrónovým mikroskopom [7]

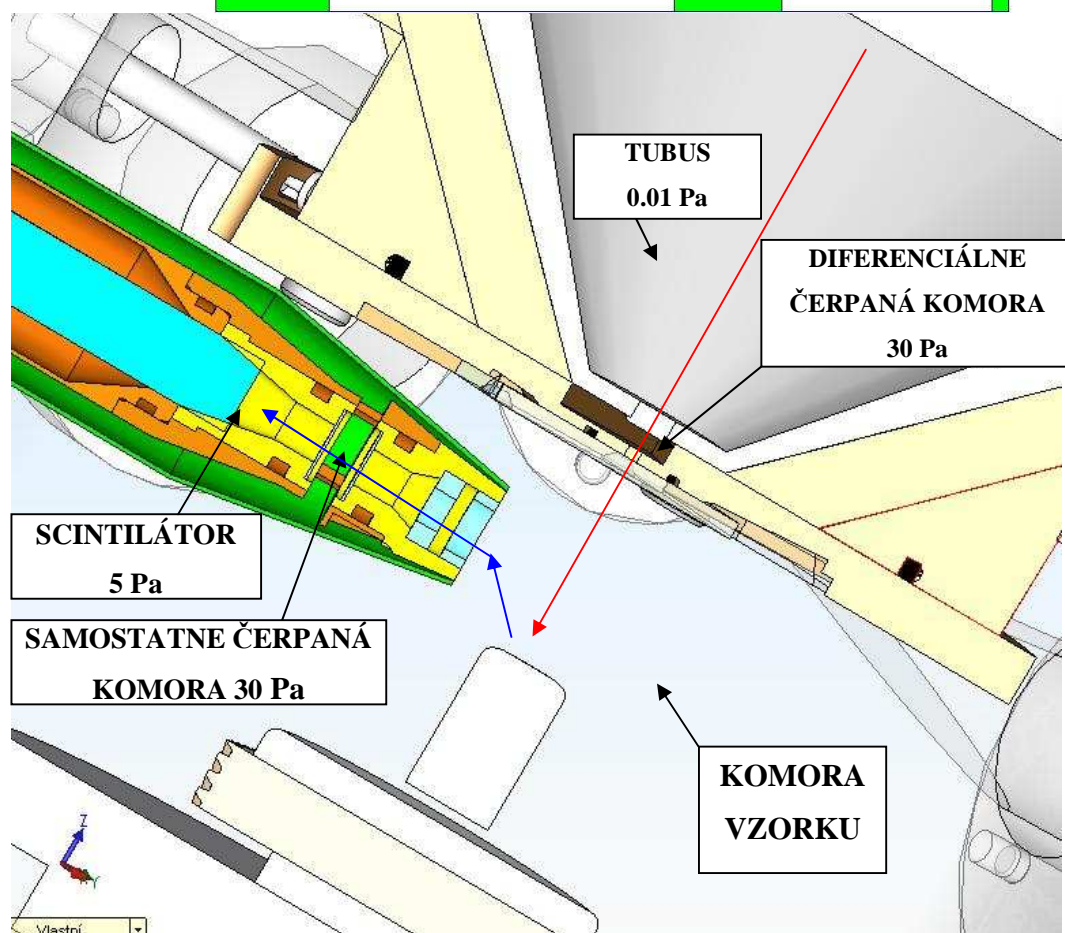
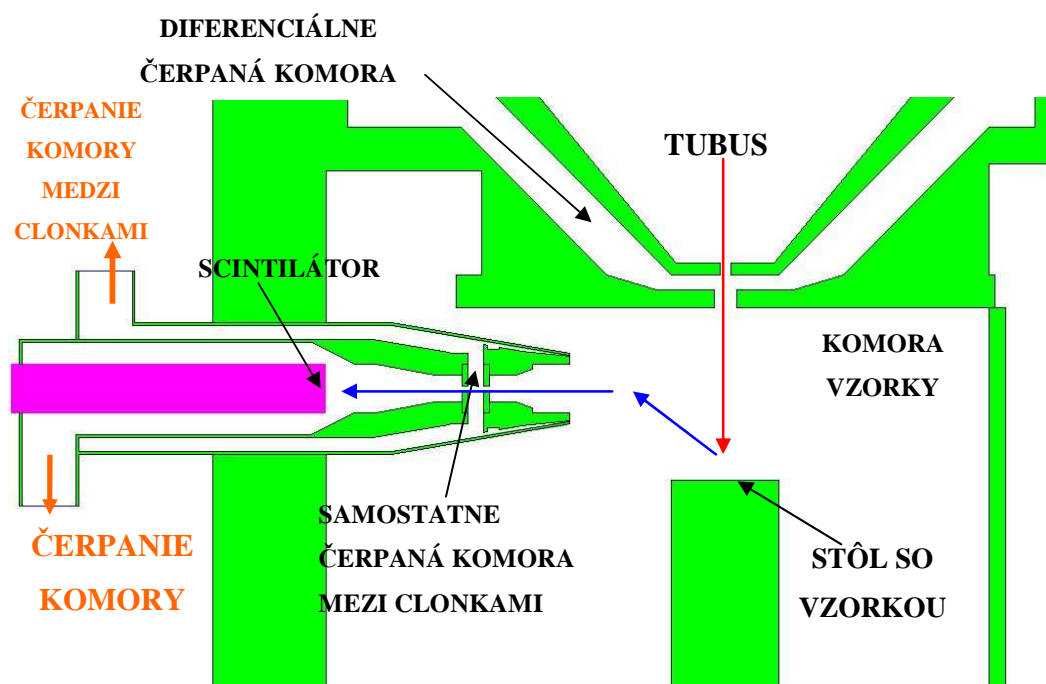
Ďalší problém nastal v tom, že máme dve komory s obrovským rozdielom tlakov a na to aby nám prešiel paprsok lúčov, či už primárnych alebo sekundárnych elektrónov je potrebný

otvor. K tomuto slúžia clonky s malým otvorom, no nemôžeme mať prostredia s takto rozdielnymi tlakmi vedľa seba. Tento problém rieši v oboch prípadoch veľmi obdobne.

Medzi tubus a komoru vzorky je vložená diferenciálne čerpaná komora, kde je tlak na hodnote asi 30 Pa.

V druhom prípade je v samotnom detektore vytvorená samostatne čerpaná komôrka, ktorá oddeľuje scintilátor od komory vzorky. Tlak je znížený samostatným čerpaním na hodnotu asi 30 Pa.

Schéma daného riešenia aj s popisom tlakov je na obr.9.5

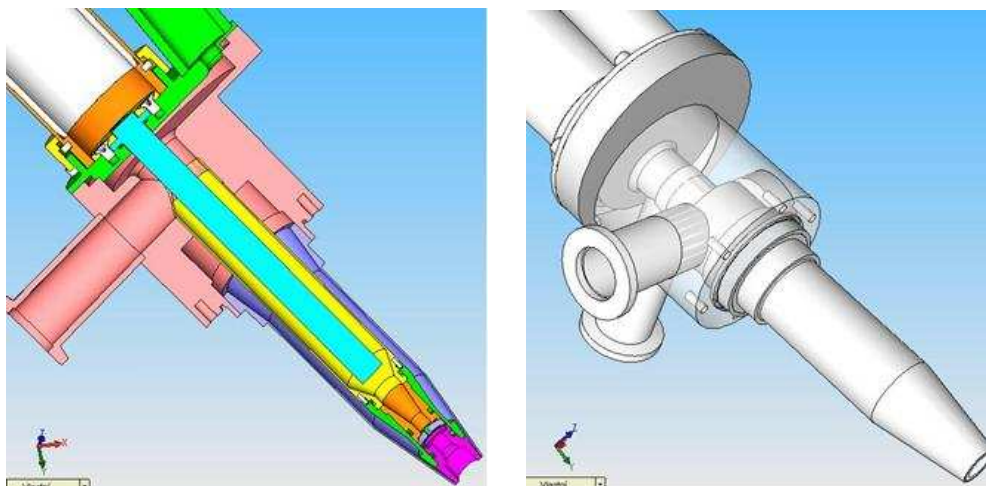


Obr.9.5 Dráha primárneho sväzku elektrónov a sekundárnych elektrónov[7]

9.1 Scintilačný Detektor sekundárnych elektrónov pre EREM

Ako už bolo spomínané v kapitole 3 o elektrónovej mikroskopii, dopad elektrónového zväzku na povrch skúmaného preparátu, vyvolá niekoľko druhov signálov, ako sú napríklad sekundárne elektróny (SE), späť odrazené elektróny (BSE), charakteristické alebo rentgenové žiarenie. Použitím správnych vyhodnocovacích metód týchto signálov je možno získať informácie o štruktúre, morfológii, kryštalografii, prípadne chemickom zložení danej vzorky alebo preparátu. V prípade nášho projektu sa jedná o scintilačný detektor sekundárnych elektrónov pre EREM.

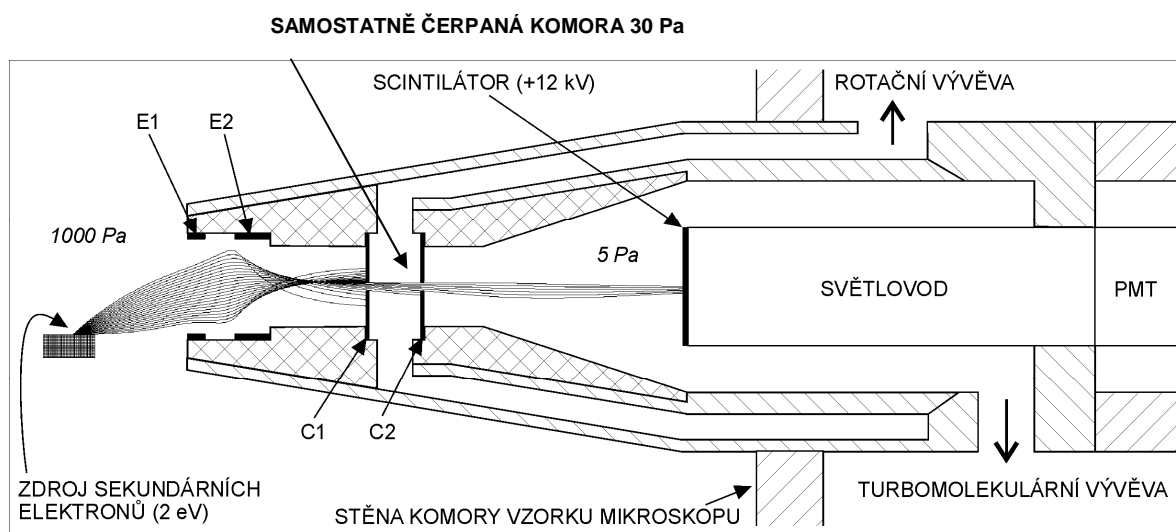
Vďaka prítomnosti vysokého tlaku plynov (až 2000 Pa) v komore vzorky elektrónového rastrovacieho mikroskopu, sú vytvorené špecifické nároky na samotnú konštrukciu tohto mikroskopu a najmä na jeho čerpací systém. Návrh jednotlivých konštrukčných častí EREM, najmä diferenciálne čerpanej komory a samostatne čerpanej komory, musia byť tak uskutočnené, aby vyhovovali náročným požiadavkám na účinné čerpanie ich vnútorného priestoru a minimalizáciu tlaku v ňom.



Obr. 9.6 Scintilačný detektor SE

Umiestnenie scintilátora v scintilačnom detektore sekundárnych elektrónov pre EREM je v samostatne čerpanej komore, ktorá je clonkami C1 a C2 oddelená od komory vzorky mikroskopu. Na clonkách sú priložené vhodné potenciály v ráde niekoľkých stoviek voltov,

clonky tak tvoria elektrostatickú šošovku. Pomocou elektród v ústí detektora sú k tejto šošovke nasmerované sekundárne elektróny, ktoré ňou následne prechádzajú. Clonky taktiež súčasne bránia prúdeniu plynu z komory vzorky (tlak 1500 až 2000 Pa) do komory scintilátora (tlak najviac 8 Pa). Veľmi nízka hodnota tohoto tlaku nám taktiež umožňuje priložiť napätie až 12 kV na scintilátor a to bez toho, aby sme sa obávali výbojov z plynu. Toto vysoké napätie na scintilátore urýchľuje elektróny prechádzajúce clonkami na energiu dostatočnú k vyvolaniu scintilácií. Takto vzniknuté fotóny scintiláciou, sú pomocou svetlovodu vedené do fotonásobiča, v ktorom sú zosilnené a prevedené na elektrický signál. Princíp scintilačného detektora sekundárnych elektrónov je uvedený na obrázku 9.7. Na tomto mieste je potrebné upozorniť na skutočnosť, že na tomto schémate sú hrdlá pre rotačnú a turbomolekulárnu vývevu voči sebe otočené o 180 stupňov, čo však v skutočnosti nie je pravda, ale sú k sebe otočené o 90 stupňov, ako vidno na obrázku 9.6. Tento fakt bude mať vplyv neskôr pri popisovaní nastavenia výpočtovej siete v systéme FloWorks.

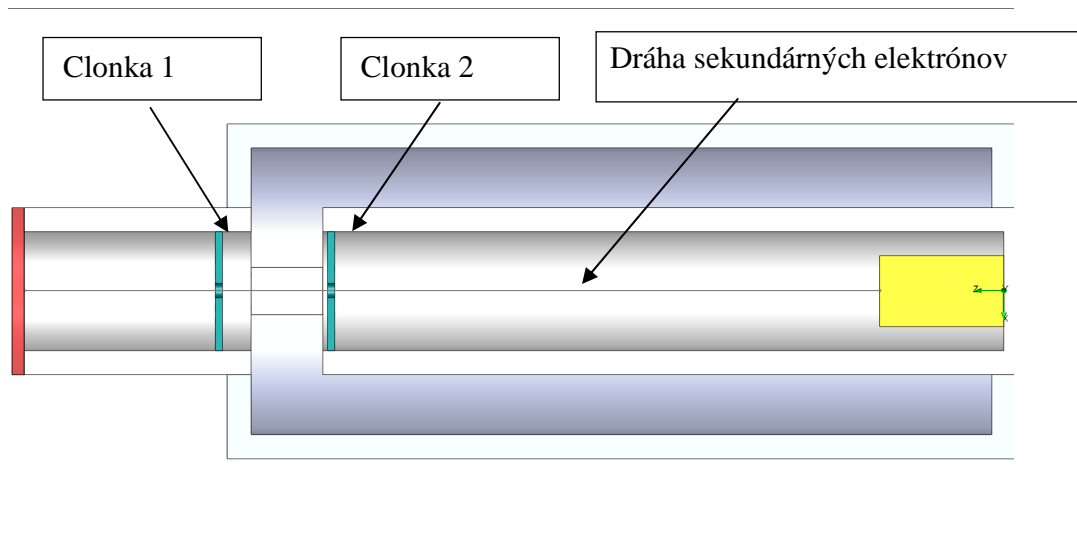


Obr. 9.7 Princíp scintilačného detektora sekundárnych elektrónov pre EREM

so simuláciou dráh sekundárnych elektrónov s energiou 2 eV (E1 – extrakčná elektróda, E2 – vychýľovacia elektróda, C1 – clonka 1, C2 – clonka 2, PMT – fotonásobič).

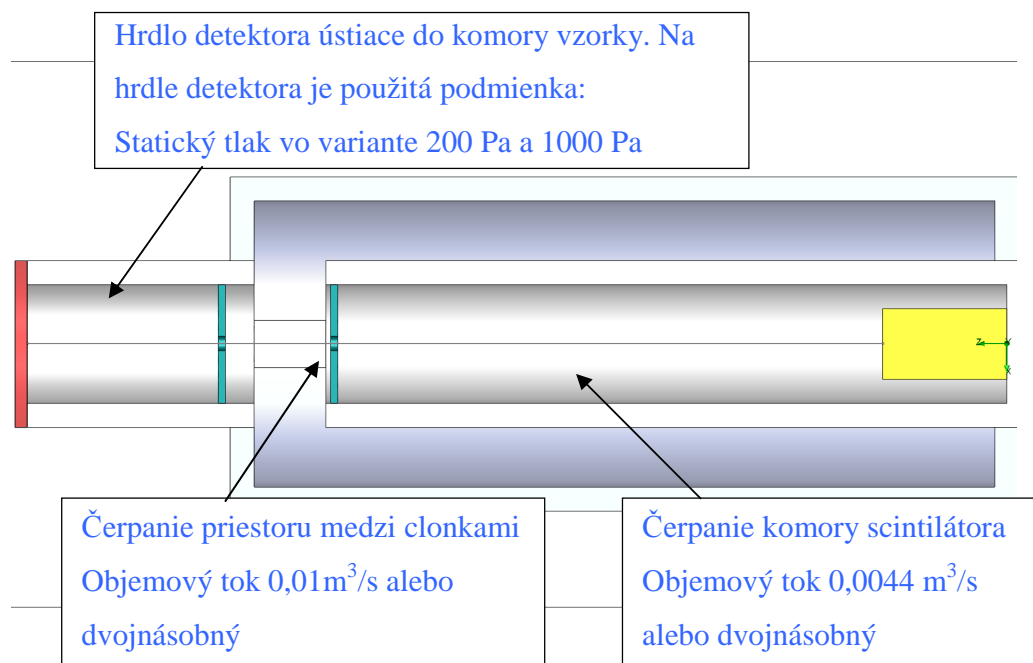
10 VÝSLEDKY A ANALÝZY

10.1 Model scintilačného detektora



Obr. 10.1 Model scintilačného detektora

V tomto prípade je treba zmieniť, že systém Cosmos FloWorks pracuje so zjednodušeným modelom detektora a to v základných rozmeroch a tvaroch, pretože je pre štrukturovanú sieť a následné výpočty výhodnejší. Od potenciálneho reálneho modelu sa líši najmä v tom, že nepočíta s výrobnými toleranciami a nepresnosťami, prípadne vzniknutými netesnosťami.



Obr. 10.2 Zobrazenie nastavenia okrajových podmienok

10.2 Nastavenie okrajových podmienok

Ako už bolo pri popise detektora v predchádzajúcej kapitole spomenuté, pre výpočet je potreba nastaviť okrajové podmienky modelu. Do detektora vedú 3 otvory :

- Hrdlo detektora vstupujúce do komory vzorky. V tejto práci sa počíta s veľkosťou tlaku v komore vzorky 200 Pa a 1000 Pa.
- Hrdlo čerpania priestoru medzi clonkami. Tento priestor je čerpaný rotačnou vývěvou s objemovým tokom $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ alebo dvojnásobným
- Hrdlo čerpania komory scintilátora. Táto komora je čerpaná turbomolekulárnou vývěvou s objemovým tokom $0,0044 \text{ m}^3/\text{s}$ alebo dvojnásobným

Tieto stavy, z ktorých vyplýva nastavenie okrajových podmienok sú patrné z obr. 9.1 a obr.9.2. Čerpanie v praxi prebieha, až do chvíle, kým nie sú dosiahnuté hodnoty okrajových podmienok.

Z daného popisu sú jednoznačne určené okrajové podmienky v jednotlivých oblastiach otvorov vstupujúcich do detektora pre naše výpočty

* **Komora scintilátora** – podľa parametrov vývevy, bola na hrdlo čerpania komory scintilátora zadaná okrajová podmienka objemového čerpania $0,0044 \text{ m}^3/\text{s}$ ako základná alebo dvojnásobná, pri zdvojenom čerpaní.

* **Priestor medzi clonkami** - podľa parametrov vývevy, bola na hrdlo čerpania priestoru medzi clonkami zadaná okrajová podmienka objemového čerpania $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ ako základná alebo dvojnásobná, pri zdvojenom čerpaní.

* **Hrdlo detektora** - na hrdle detektora ústiacom do komory vzorky bola postupne nastavovaná okrajová podmienka – statický tlak pre hodnoty 200Pa a 1000 Pa.

10.3 Spracovanie výsledkov analýzy

Odčerpávaním vzduchu cez hrdlo detektora ústiaceho do komory vzorky z komory scintilátora a súčasne aj zo samostatne čerpanej komory medzi clonkami C1 a C2 nastáva prúdenie vzduchu na niekoľkých miestach súčasne. Medzi hrdlom detektora a clonkou C1, ďalej prúdi vzduch clonkou C1 do samostatne čerpanej komory medzi clonkami a ďalšie prúdenie nastáva clonkou C2 do komory scintilátora. Pre výpočty sú nastavené okrajové podmienky statického tlaku na hrdle detektora ústiaceho do komory vzorky, kde sme nastavovali hodnoty 200 Pa a 1000 Pa. Okrajové podmienky objemového toku na hrdle odčerpávania komory vývevou medzi clonkami na hodnotu $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$ ako jednu možnosť a v ďalšom prípade hodnotu $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ v prípade zdvojeného čerpania. Ďalšia okrajová podmienka je na hrdle čerpania komory scintilátora a to hodnota objemového čerpania $0,0044 \text{ m}^3/\text{s}$ ako základná alebo $0,0088 \text{ m}^3/\text{s}$ v prípade zdvojeného čerpania.

Označenie použitých variant :

Varianta 1-1 : základné čerpanie v priestore medzi clonkami, základné čerpanie u scintilátora

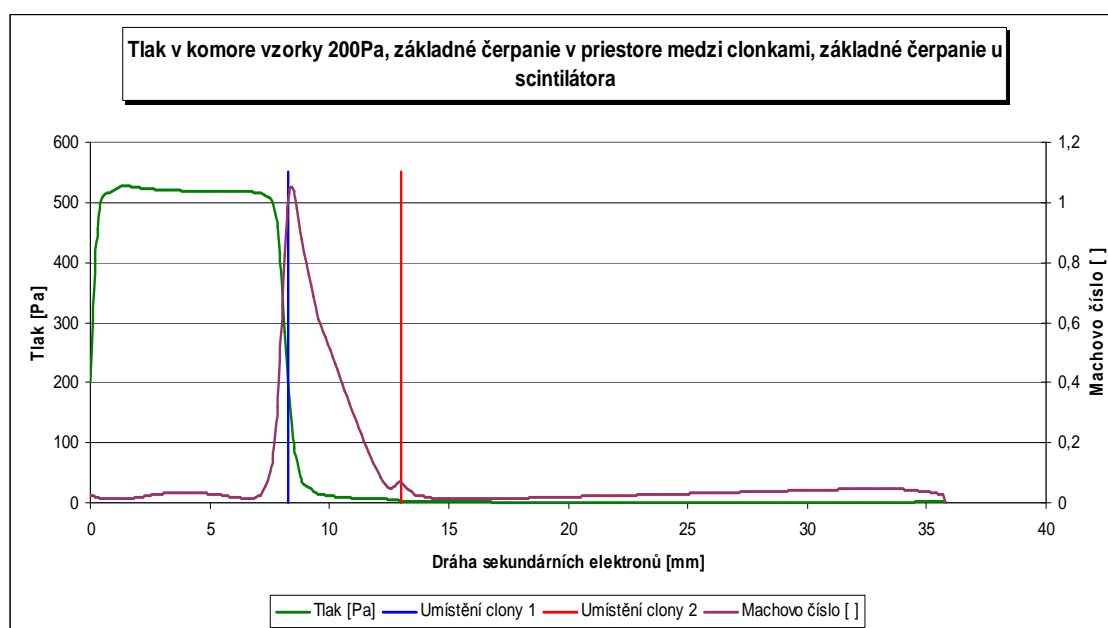
Varianta 1-2 : základné čerpanie v priestore medzi clonkami, zdvojené čerpanie u scintilátora

Varianta 2-1 : zdvojené čerpanie v priestore medzi clonkami, základné čerpanie u scintilátora

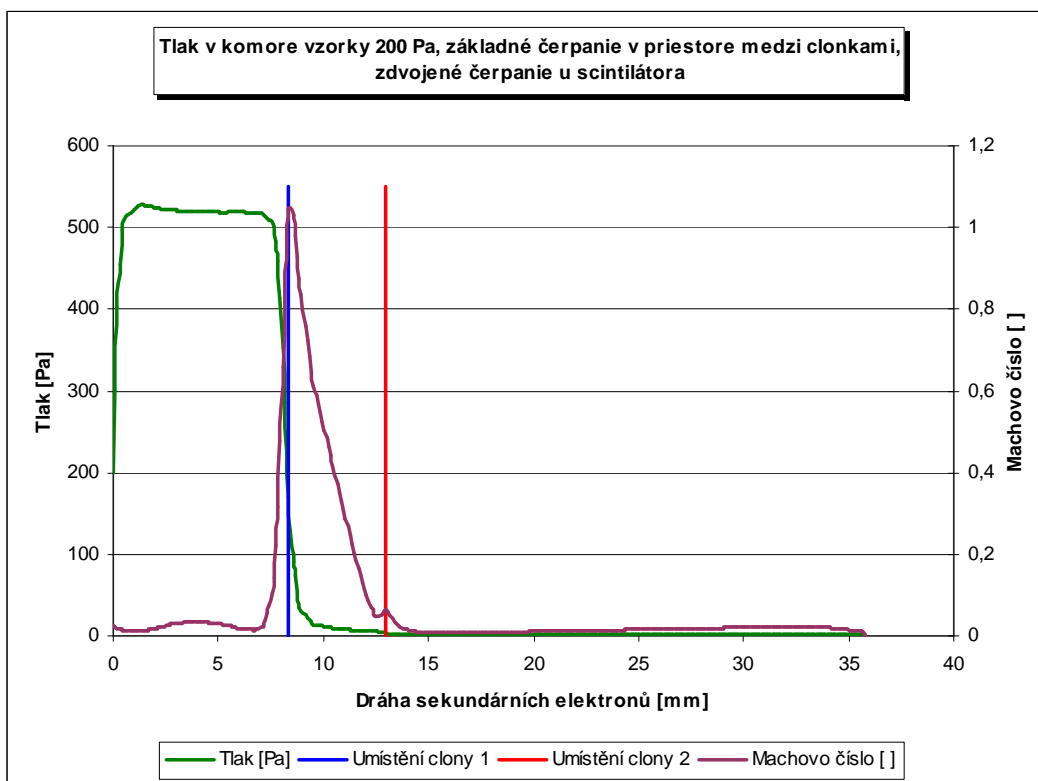
Varianta 2-2: zdvojené čerpanie v priestore medzi clonkami, zdvojené čerpanie u scintilátora

10.3.1 Prehľad priebehov tlakov a Machovho čísla

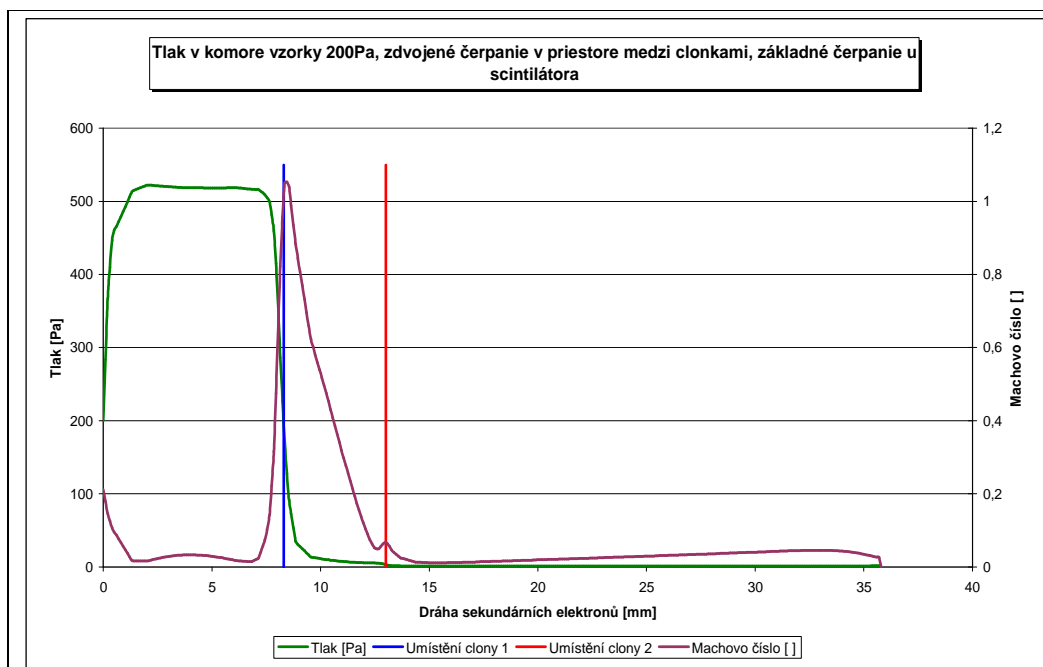
Prehľad priebehov tlakov a Machovho čísla pre tlak v komore vzorky 200 Pa so základným alebo zdvojeným čerpaním.



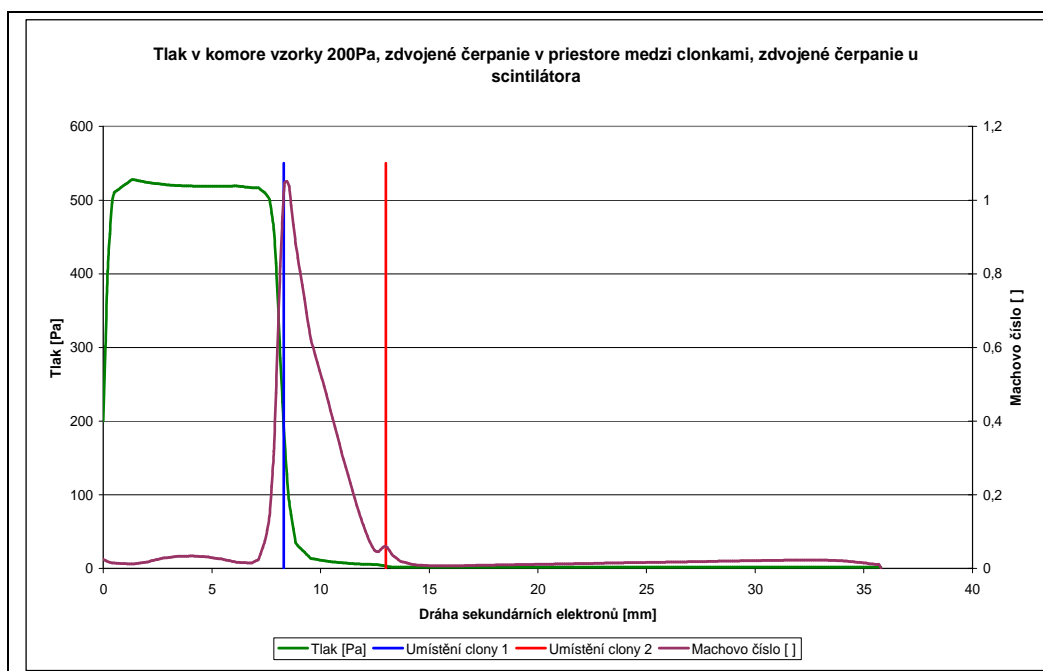
Obr. 10.3 Priebeh Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa, varianta 1-1



Obr. 10.4 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa, varianta 1-2



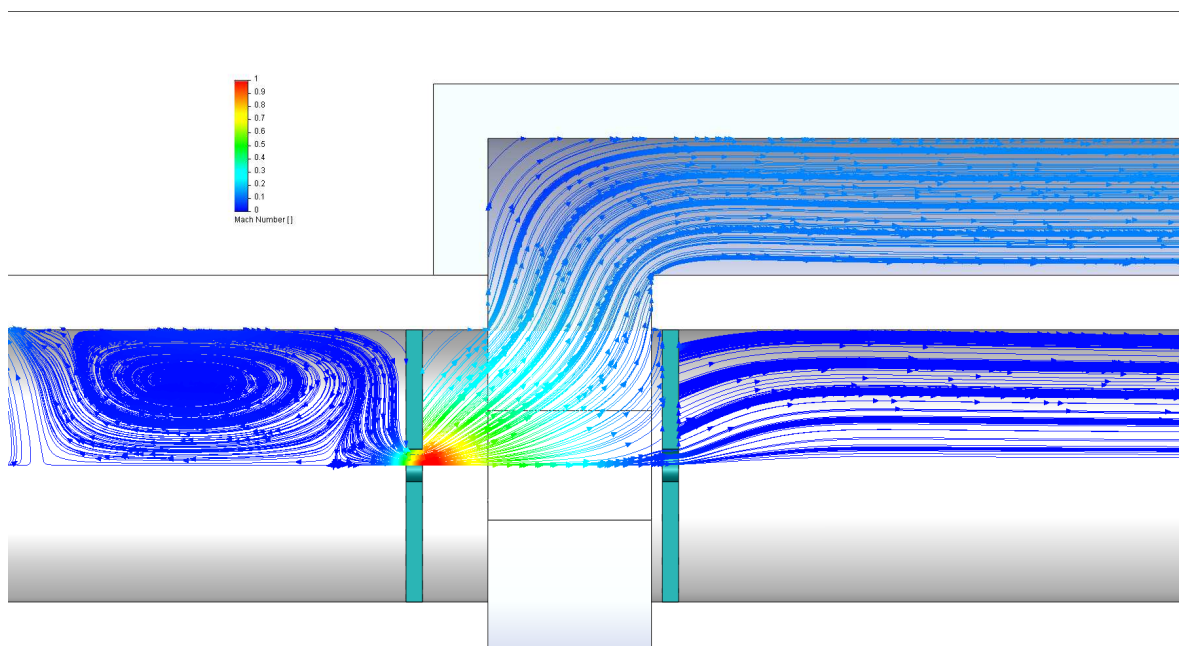
Obr. 10.5 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa, varianta 2-1



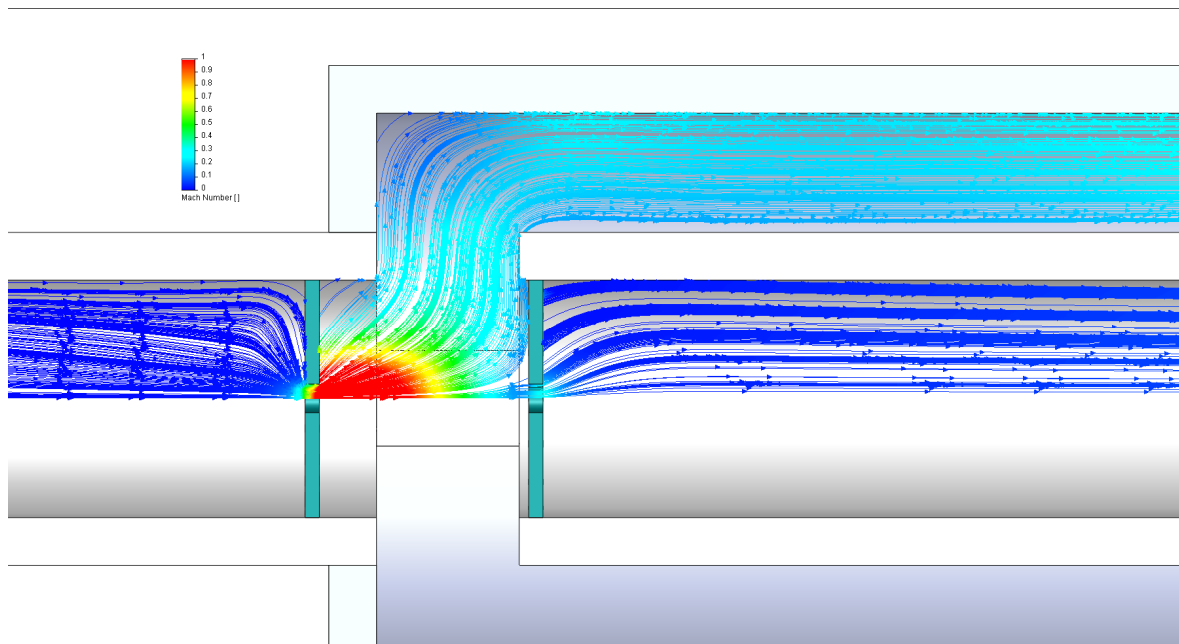
Obr. 10.6 Priebch Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa, varianta 2-2

Zhodnotenie priebehov machovo čísla z analýzy pre 200 Pa:

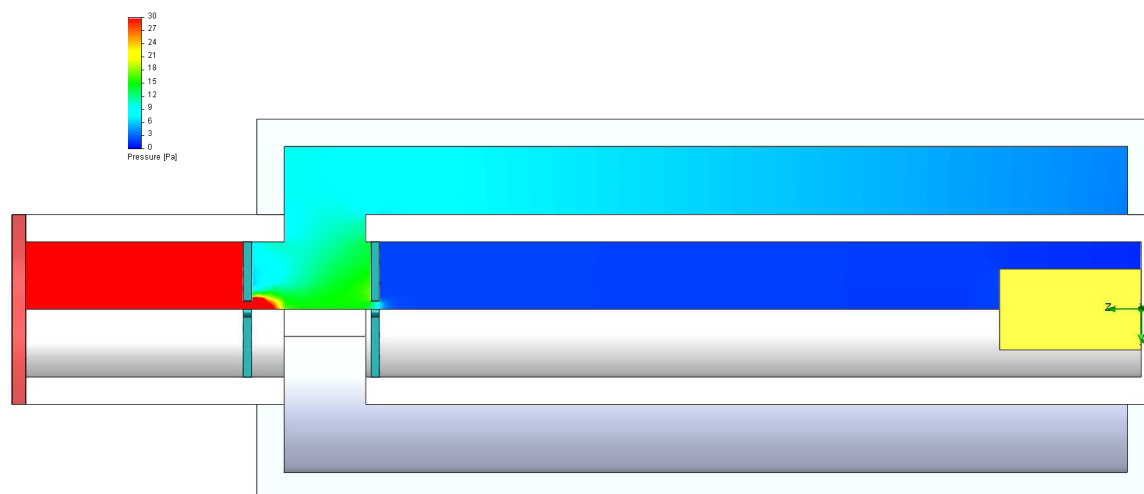
Z grafov (obr. 10.3 až 10.6) je vidieť, že použitie základného čerpania alebo zdvojeného nemá veľký vplyv na priebeh tlakov v jednotlivých komorách a rozdiel len nepatrný. Odchýlka je len v prípade kedy bolo použité základné čerpanie pre priestor medzi clonkami a zdvojené čerpanie pre priestor scintilátora (obr. 10.4). V tomto prípade nastal u clonky 2 nárast Machovho čísla asi o 0,2 v porovnaní s ostatnými prípadmi, čo bolo spôsobené vírením plynu pred vstupom do prvej clonky (obr. 10.5). Pre porovnanie je priebeh prúdenia plynu pred vstupom do prvej clonky, pri použití základného čerpania pre priestor medzi clonkami i pre priestor scintilátora na obr.10.8 a priebeh prúdenia plynu pri použití základného čerpania pre priestor medzi clonkami a zdvojeného čerpania pre priestor scintilátora na obr.10.7. Ostatné grafické priebehy prúdenia plynu, Machovho čísla a tlaku v jednotlivých komorách ako pre 200 Pa tak pre 1000 Pa sú v prílohe.



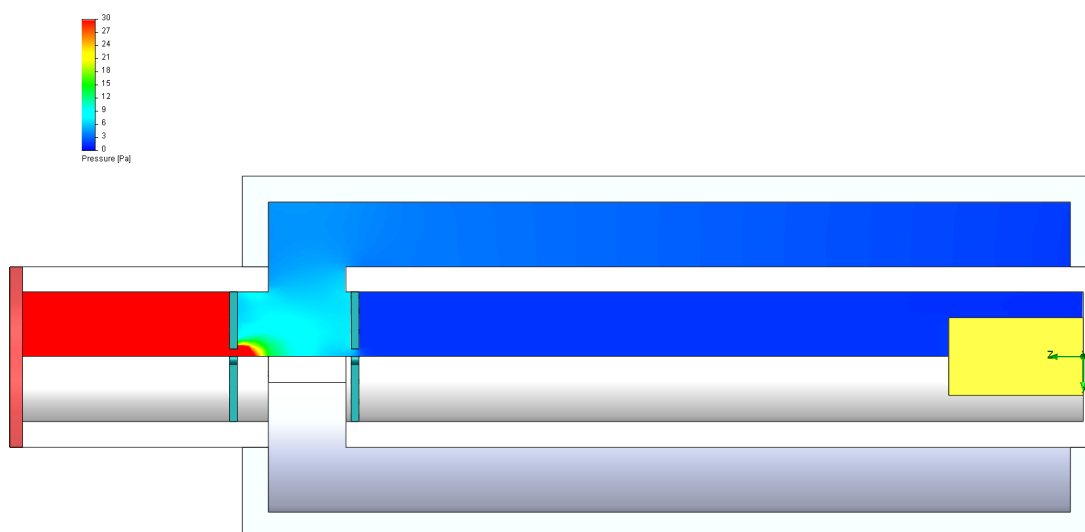
Obr. 10.7 Priebch Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa,varianta 1-2



Obr. 10.8 Priebch Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa,varianta 1-1

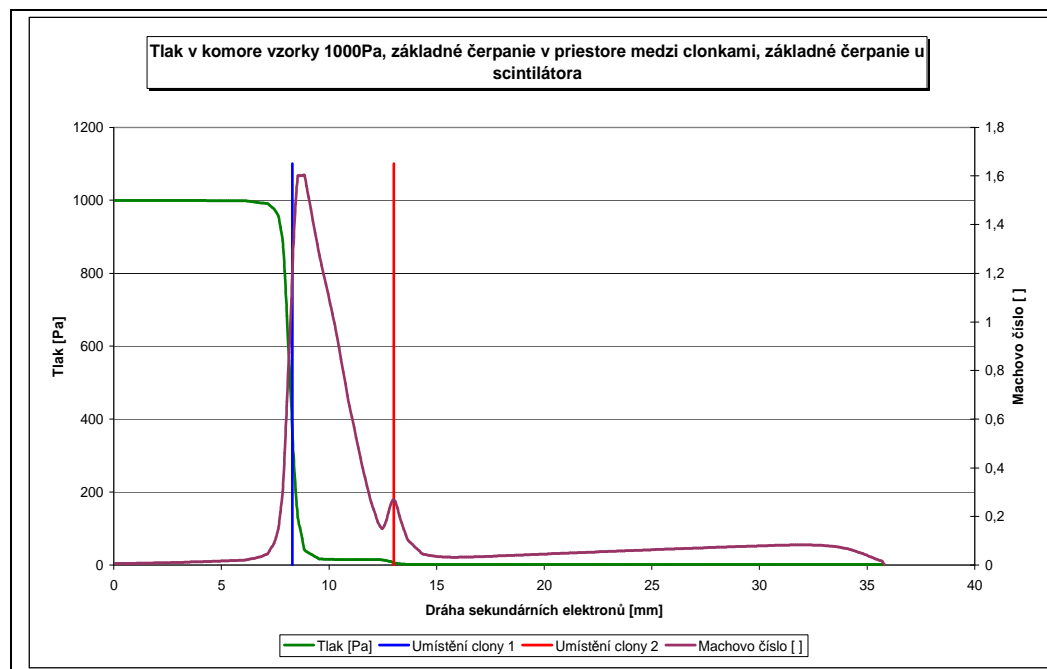


Obr. 10.9 Pribeh tlakov pre tlak v komore 200 Pa,varianta 1-1

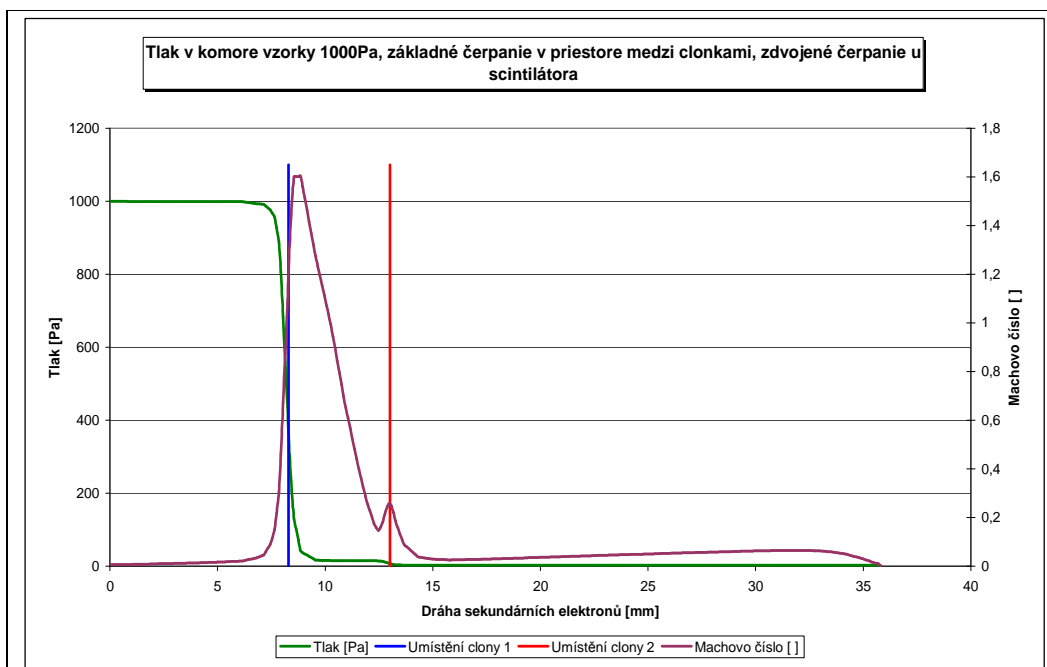


Obr. 10.10 Pribeh tlakov pre tlak v komore 200 Pa,varianta 1-2

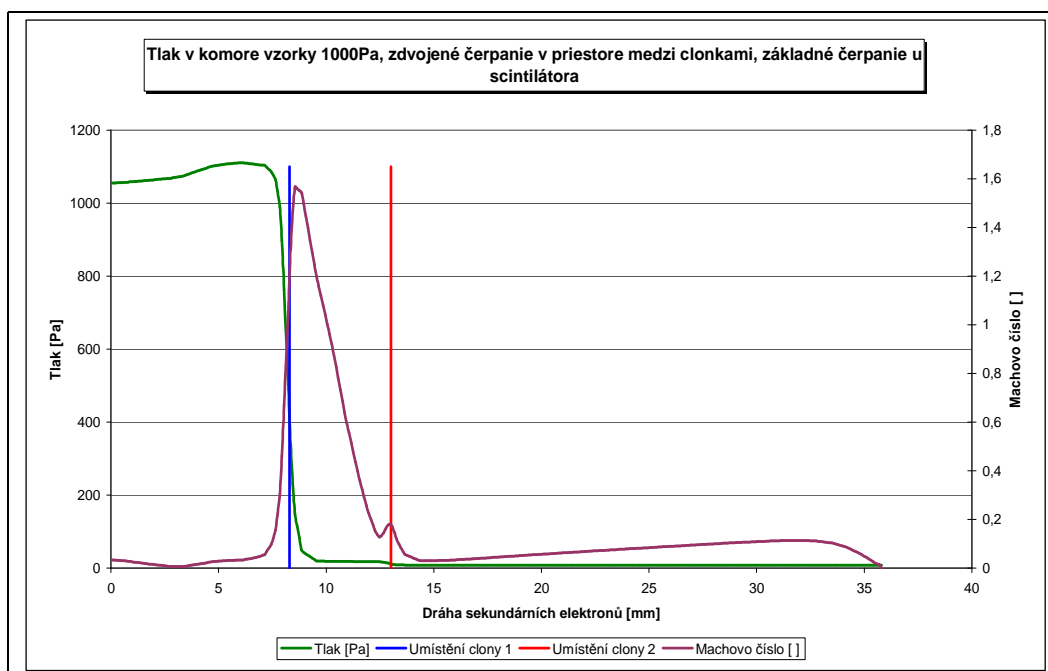
Prehľad priebehov tlakov a Machovho čísla pre tlak v komore vzorky 1000 Pa so základným alebo zdvojeným čerpaním.



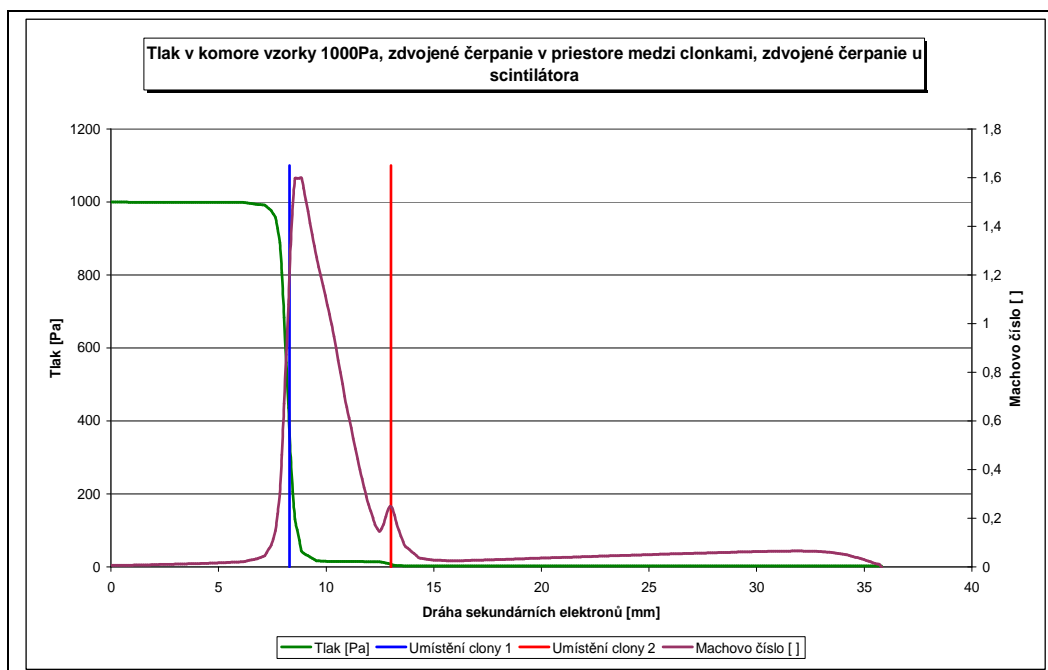
Obr. 10.11 Priebeh Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa, varianta 1-1



Obr. 10.12 Priebeh Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa. varianta 1-2



Obr. 10.13 Priebch Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa, varianta 2-1



Obr. 10.14 Priebch Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa, varianta 2-2

Zhodnotenie priebehov Machovo čísla z analýzy pre 1000 Pa:

Pri porovnaní grafov (obr. 10.11 až obr.10.14) priebehov Machovho čísla pre prípady, kedy bol tlak v komore vzorky nastavený na 1000Pa, je veľmi ťažké nájsť nejaký rozdiel, z čoho plynie, že v tomto prípade nemá použitie zdvojeného čerpania žiaden dôsledok na priebeh odčerpávania.

10.3.2 Porovnanie variant výjev z hľadiska dosiahnutého najnižšieho tlaku v komore scintilátora

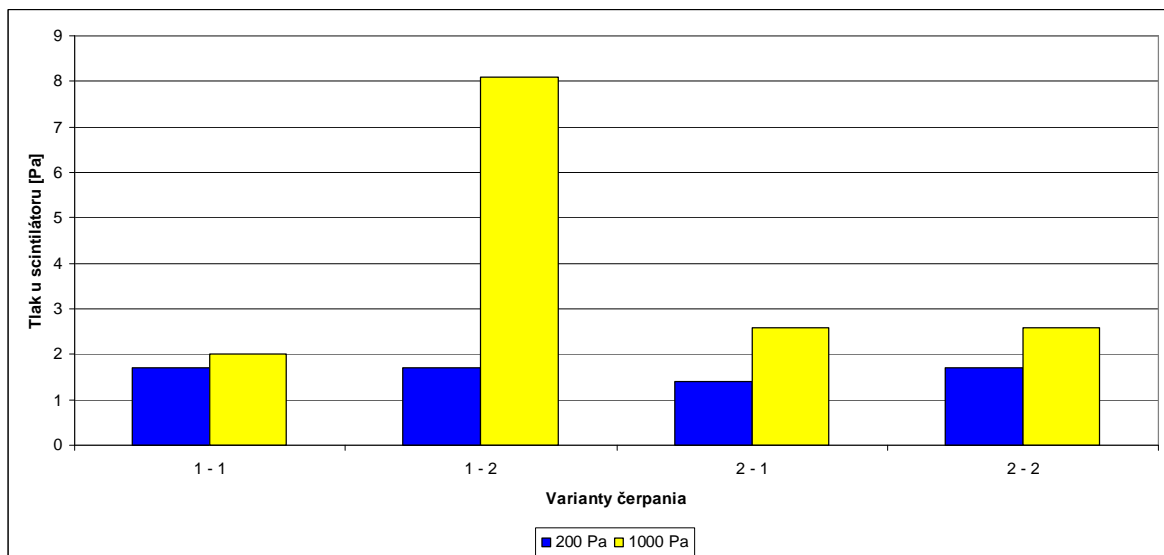
Použité varianty :

Varianta 1-1 : základné čerpanie v priestore medzi clonkami, základné čerpanie u scintilátora

Varianta 1-2 : základné čerpanie v priestore medzi clonkami, zdvojené čerpanie u scintilátora

Varianta 2-1 : zdvojené čerpanie v priestore medzi clonkami, základné čerpanie u scintilátora

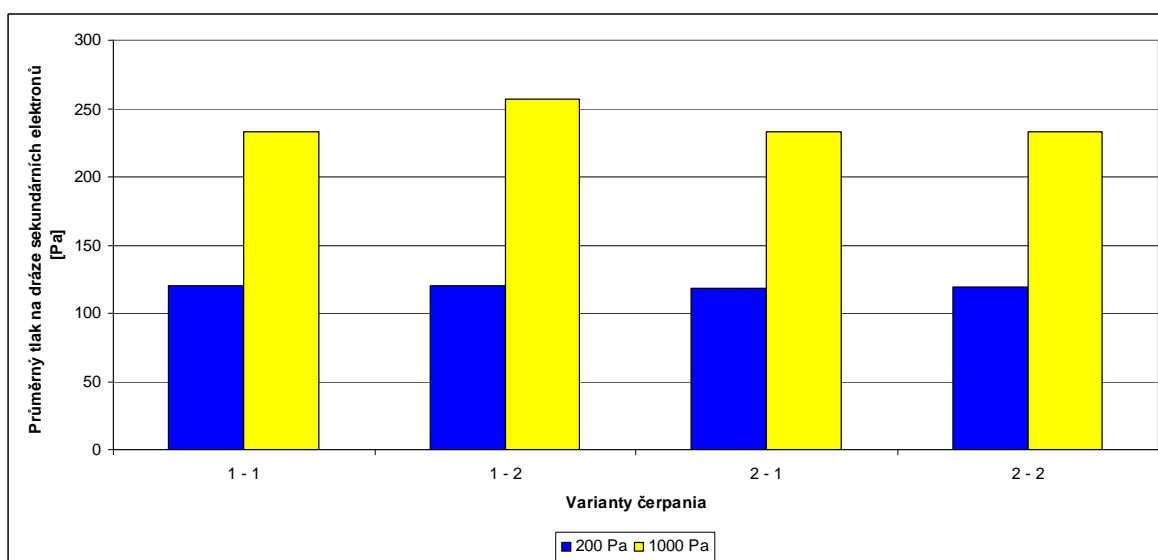
Varianta 2-2: zdvojené čerpanie v priestore medzi clonkami, zdvojené čerpanie u scintilátora



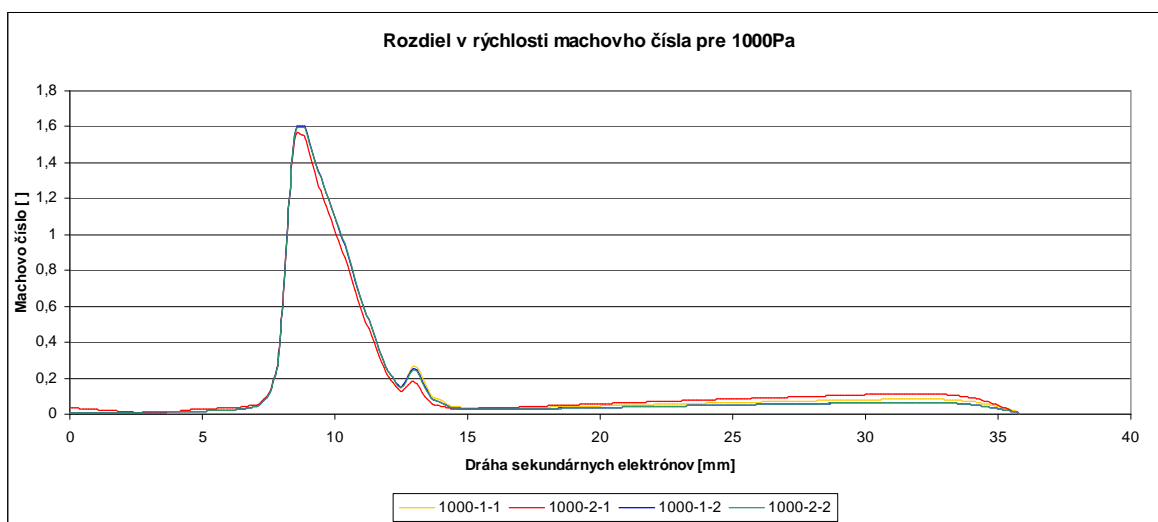
Obr. 10.11 Zobrazenie tlaku u scintilátora pre jednotlivé varianty výjev

Z grafu (obr.10.11) je patrné, že tlak dosiahnutý v komore scintilátora sa v troch prípadoch len nepatrne líši, z čoho vyplýva, že požadovaných hodnôt bolo dosiahnutých ako

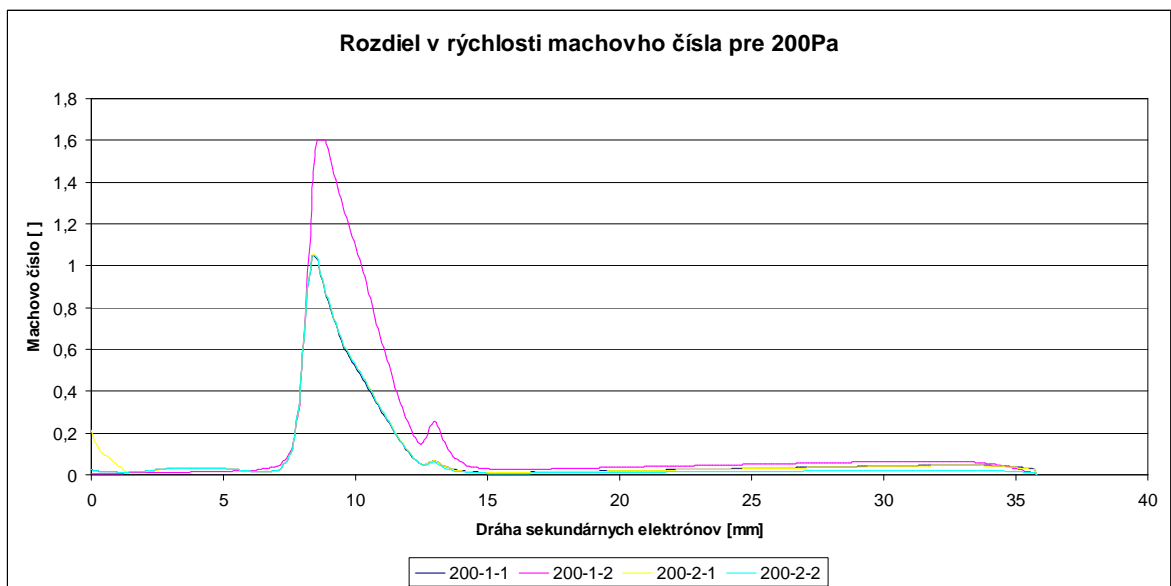
základným tak aj zdvojeným čerpaním. Čiže zosilnené čerpanie nemá v tomto prípade zásadnejší vplyv na priebeh čerpania vzduchu v komore scintilátora. V prípade varianty 1-2 spôsobujú väčší rozdiel, zmenené podmienky pri vstupe druhej clonky.



Obr. 10.12 Tlak na dráhe sekundárných elektrónov pre jednotlivé varianty vývev



Obr. 10.13 Rozdiel v rýchlosti Machovho čísla pre 1000 Pa



Obr. 10.14 Rozdiel v rýchlosti Machovho čísla pre 200 Pa

11 ZÁVER

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou environmentálneho rastrovacieho mikroskopu, najmä štúdiom vplyvu výkonu vývev na prúdenie plynu v scintilačnom detektore. Cieľom práce bolo pomocou systému CosmosFloWorks vyhodnotiť rozdiely v oblasti prúdenia plynu v dráhe sekundárnych elektrónov pri rôznych výkonoch použitých vývev a rôznych tlakoch v komore vzorky u scintilačného detektora environmentálneho rastrovacieho mikroskopu.

V teoretickej časti práce sú niektoré kapitoly venované popisu základov elektrónovej mikroskopie so zameraním na danú tému. V tomto prípade to bol scintilačný detektor, konštruovaný pre použitie v špeciálnom druhu elektrónového mikroskopu, schopného pracovať vo vyšších tlakoch umožňujúci skúmať vlhké vzorky.

V tomto detektore je umiestnená čerpaná komora oddeľujúca oblasti s veľmi rozdielnymi tlakmi. Oddelenie jednotlivých oblastí je tvorené pomocou cloniek s veľmi malými otvormi. Tieto oblasti sú čerpané rôznymi typmi vývev, aby sa dosiahlo požadovaných tlakov v jednotlivých oblastiach.

Preto sa ďalšia časť práce zaoberala rôznymi typmi vývev a ich možnosťami použitia pre dané podmienky, pre ktoré sú konštruované, so zameraním na najviac používané typy a to rotačné a turbomolekulárne vývevy.

V ďalšej časti boli pomocou systémov CAD a CAE a na základe matematicko-fyzikálneho modelu, analyzované podmienky prúdenia v priestoroch scintilačného detektora s ohľadom na zvláštnosti prúdenia v otvoroch malých dimenzií. Tieto výpočty prebiehali na vytvorených 3D modeloch, mierne zjednodušeného tvaru z dôvodu pre výhodnejšie vytvorenie štruktúrovanej výpočtovej siete.

Analýzy preukázali očakávaný predpoklad, že prípadné zvyšovanie výkonu vývev, nie je v tomto prípade rozhodujúce, nakoľko hlavný dopad na výsledky majú práve fyzikálne vlastnosti tzv. kritického prúdenia v otvoroch malých rozmerov. Pre splnenie požadovaného účelu je dostačujúci výkon vývev taký, aby bolo na clonkách dosiahnuté kritické prúdenie. Toto dokazujú i grafy, ktoré uvádzajú hodnotu Machovho čísla na skúmanej dráhe sekundárnych elektrónov, z ktorých plynie ustálené prúdenie plynu v clonkách detektora bez výraznejšieho ohľadu na výkon vývev. Výsledkom je, že ďalšie navyšovanie výkonu už

nemá výraznejší vplyv na odčerpávanie vzduchu z jednotlivých oblastí detektora, čo veľmi dobre dokazujú obrázky priebehov tlakov pre jednotlivé varianty, kde je vidieť, že rozdiely v tlakoch sú veľmi malé, miestami až nerozoznateľné jedna od druhej.

12 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

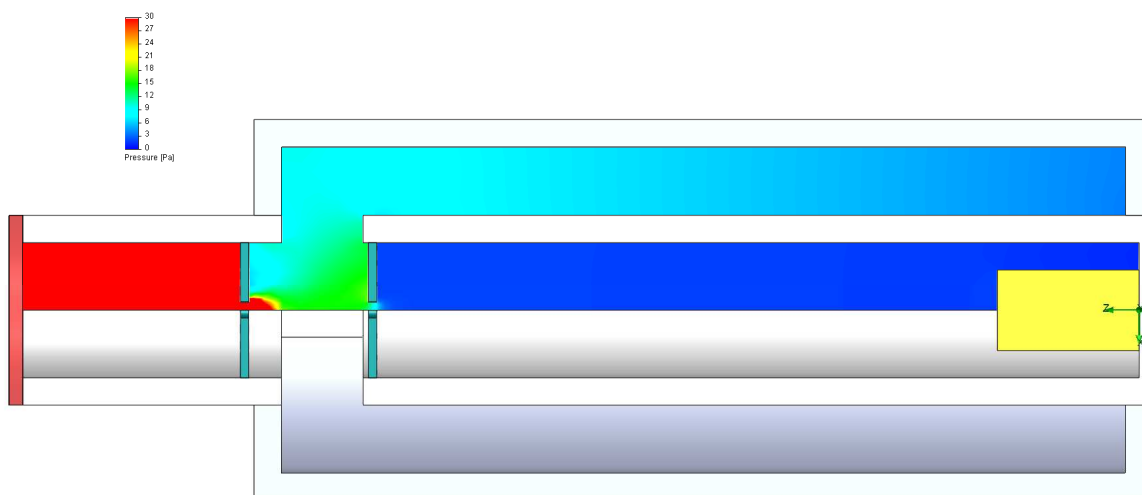
AE	Augerove Elektróny
AV ČR	Akademie Věd České Republiky
BSE	Backscattered elektron – spätne odrazené elektróny
CAD	Computer Aided Design – počítačová podpora návrhu
CAE	Computer Aided Engineering – počítačová podpora inžinierskych prací
EREM	Environmentálny Rastrovací Elektrónový Mikroskop
ESEM	Environmental Scanning Electron Microscope - environmentálny rastrovací elektrónový mikroskop
FSE	Fast Secondary Electrons – rýchle sekundárne elektróny
HV	High Vakuum – vysoké vákuum
JV	Ihlový Ventil
LV	Low Vacuum – nízke vákuum
PE	Primárne Elektróny
PMT	Photomultiplier Tube – fotonásobič
REM	Rastrovací Elektrónový Mikroskop
RTG	Rentgenové žiarenie
RV	Rotačná Výveva
DV	Difuzna výveva
SD	Scintilačný Detektor
SE	Sekundárne Elektróny
SEM	Scanning Electron Microscope - Rastrovací Elektrónový Mikroskop
TEM	Transmising Elektron Microscope – Prežarovací elektrónový mikroskop
YAG	Yttrium Aluminum Garnet krystal

13 POUŽITÁ LITERATÚRA

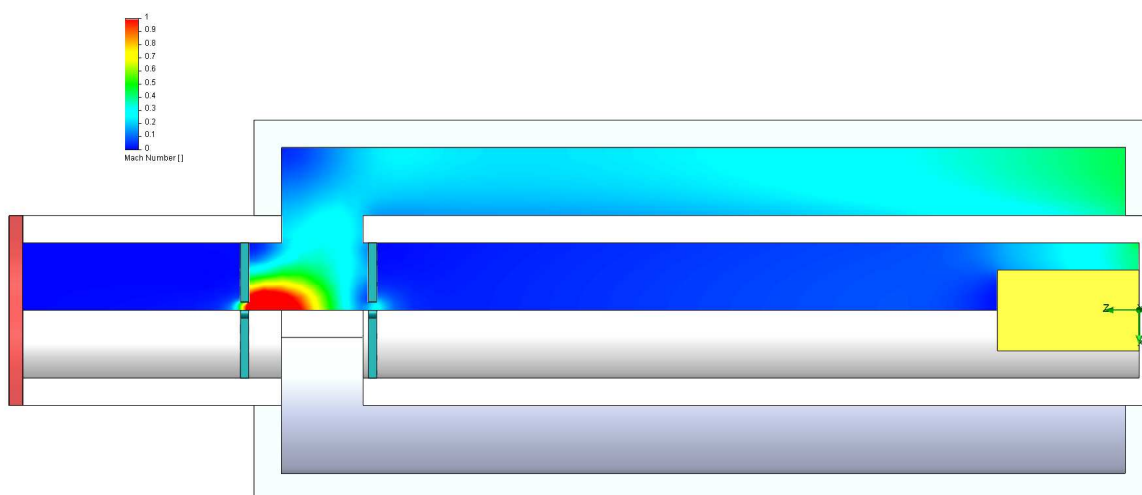
- [1] GROSZKOWSKI, J. *Technika vysokého vakua*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1981. 440 stran ISBN 04 – 005 – 81.
- [2] LUKÁČ, P., MARTIŠOVITŠ, V. : *Netesnosti vákuových systémov* [cit. 2011-10-05]. dostupné z WWW: http://www.fmph.uniba.sk/fileadmin/user_upload/editors/sluzby/kniznica/el_materialy/svet/net_vak_sys.pdf
- [3] <http://physedu.science.upjs.sk/kvapaliny/lamturprud.htm>
- [4] Fyzikální základy vědy o materiálu [cit. 2011-02-05] dostupné z WWW : <http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzv1a/FMkomplet2.htm>
- [5] FLEISCHNER, P. *Mechanika tekutin*. VUT : Brno, 1984.
- [6] HULÍNSKÝ, V.; JUREK, K.: *Zkoumání látek elektronovým paprskem*. Praha: SNTL, 1982. 401 s. ISBN 04-817-83
- [7] Habilitační práce, Analýza proudění plynu v zařízeních elektronového mikroskopu , Ing. Mgr. Jiří Maxa, Ph.D. 2008. 184 s.
- [8] NOSKIEVIČ, J. : *Dynamika tekutinových mechanizmů*– Vyd. 1. – Ostrava : VŠB-TU 1995, 166 s. : ISBN 80-7078-297-8
- [9] Internetová učebnice, [cit. 2010-10-05] dostupné z WWW: <http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/elmikro.pdf>
- [10] KOZUBKOVÁ, M., DRÁBKOVÁ, S. Numerické modelování proudění – FLUENT I. [cit. 2010-11-21] [Online]. c2003. Ostrava: VŠB – TUO, 116 s, Dostupné z: <URL:<http://www.338.vsb.cz/seznam.htm>>
- [11] NOŽIČKA, J.: *Mechanika tekutin*. ČVUT : Praha, 2004
- [12] KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění - Fluent I*. VŠB-TU : Ostrava, 2008.
- [13] HEJZLAR, R.: *Mechanika tekutin*. ČVUT : Praha, 2001.
- [14] NEDĚLA V., AUTRATA R.: *Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie*, Československý časopis pro fyziku, (3) (2005) 251.

14 PRÍLOHY

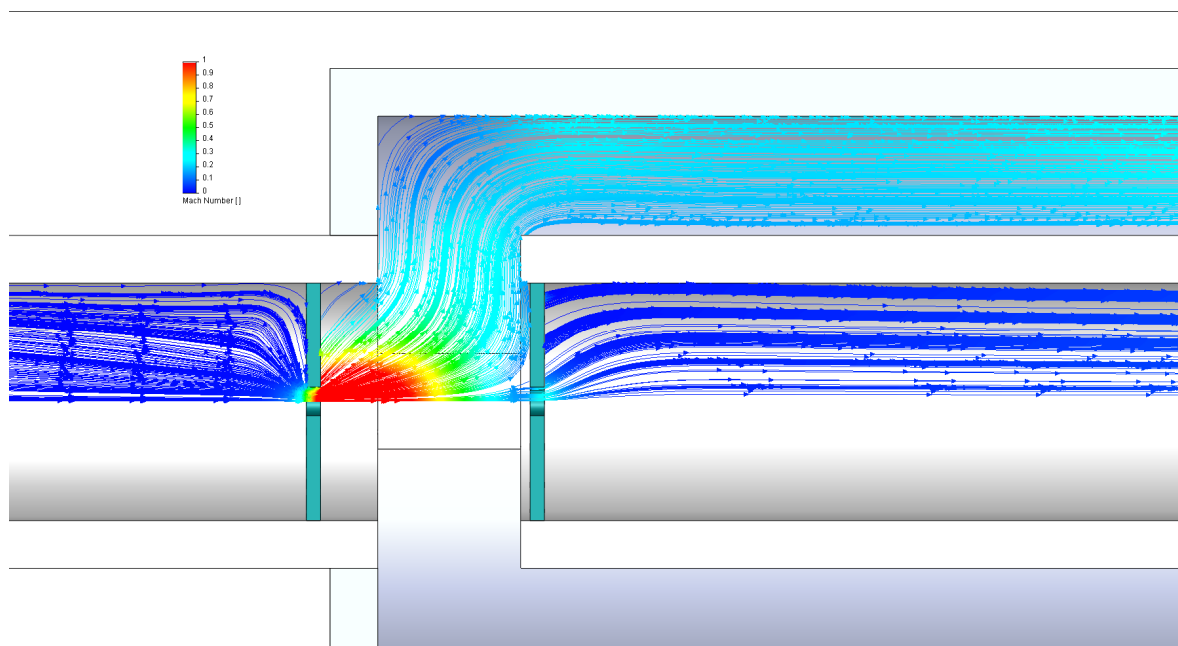
200-1-1



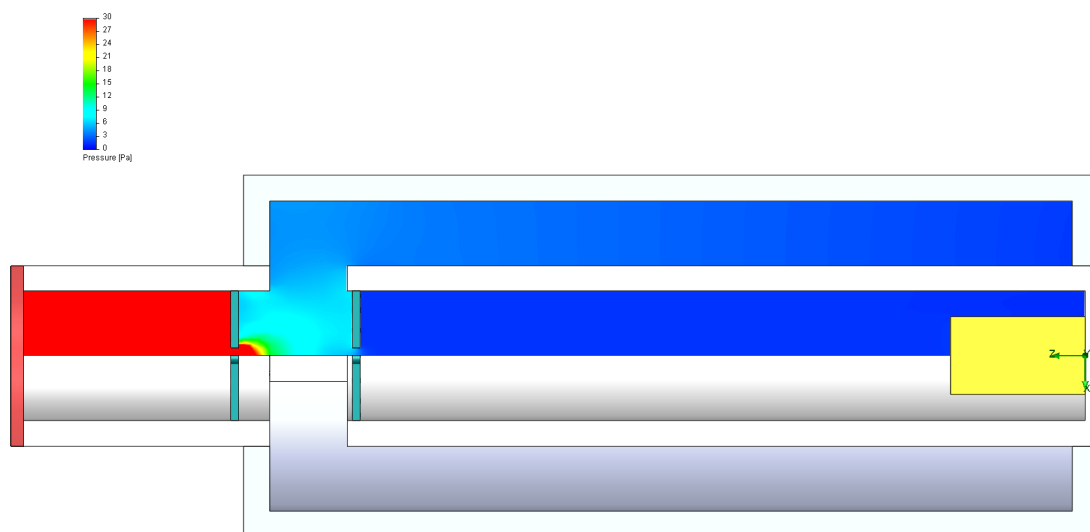
Obr. 14.1 Priebeh tlakov pre tlak v komore 200 Pa, varianta 1-1



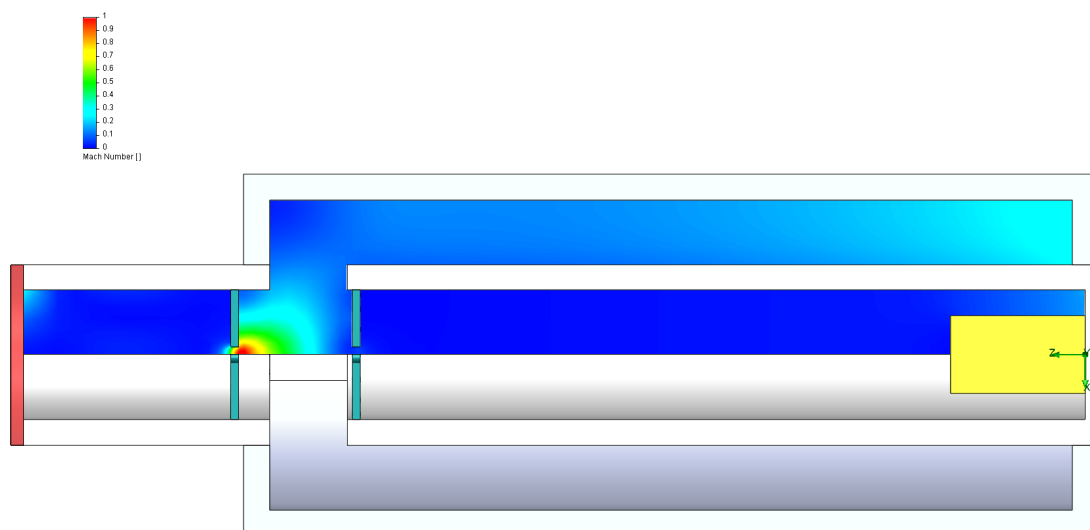
Obr. 14.2 Priebeh Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa, varianta 1-1



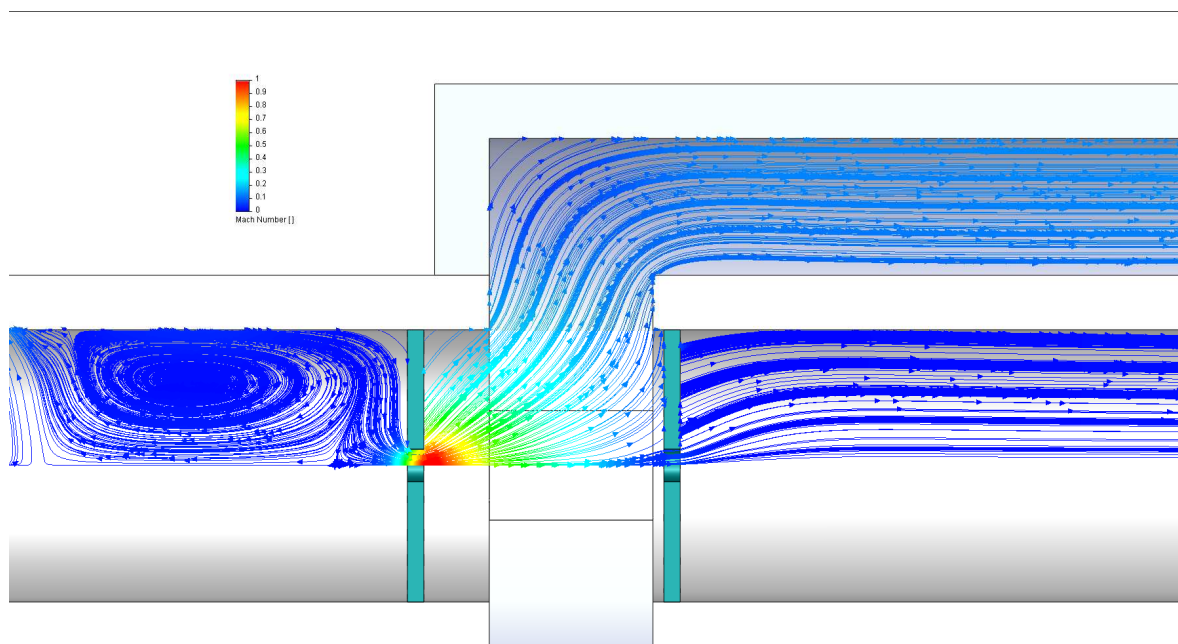
Obr. 14.3 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa,varianta 1-1



Obr. 14.4 Pribeh tlakov pre tlak v komore 200 Pa,varianta 1-2

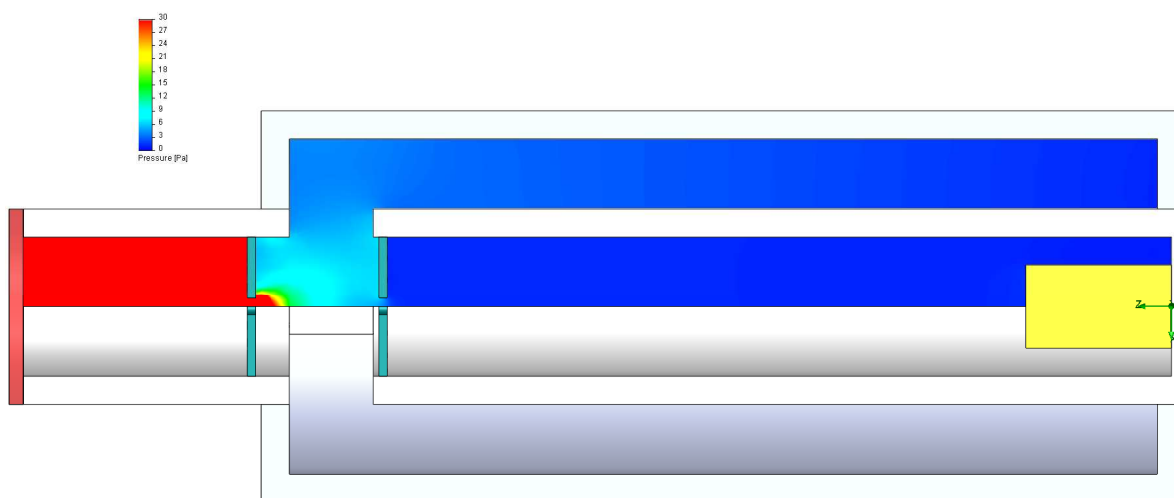


Obr. 14.5 Pribeh Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa,varianta 1-2

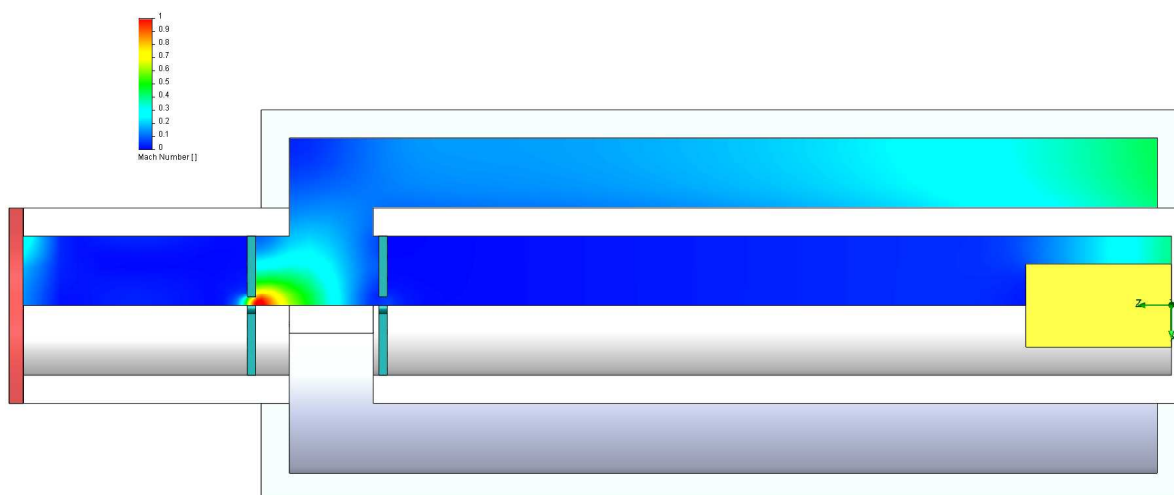


Obr. 14.6 Priebeh Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa, varianta 1-2

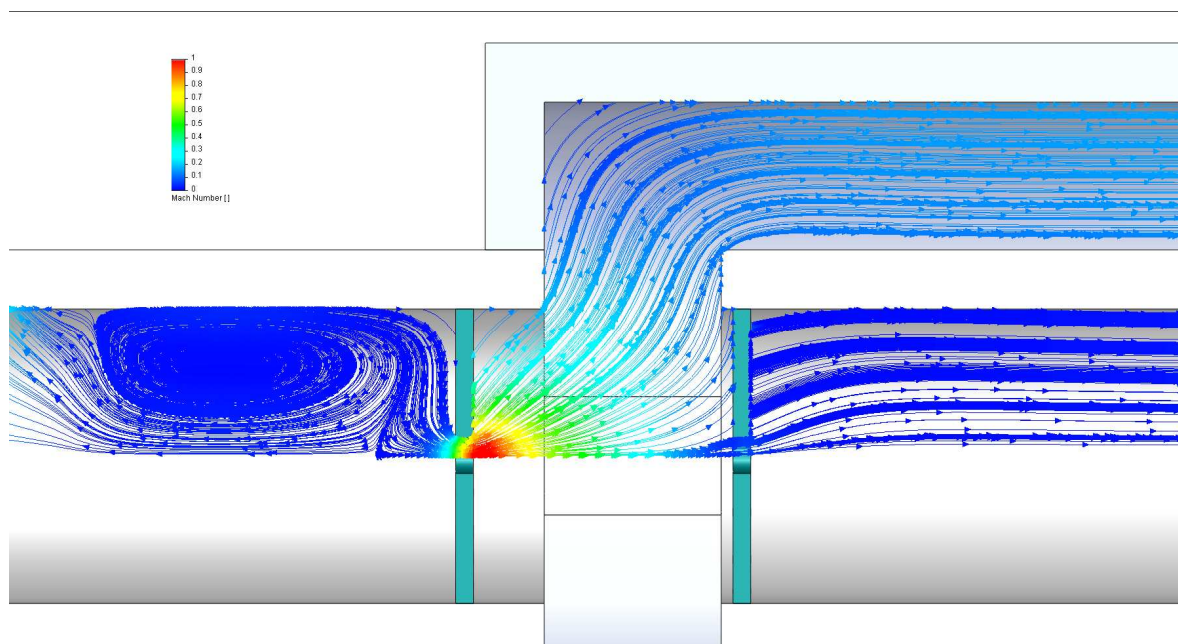
200-2-1



Obr. 14.7 Priebeh tlakov pre tlak v komore 200 Pa,varianta 2-1

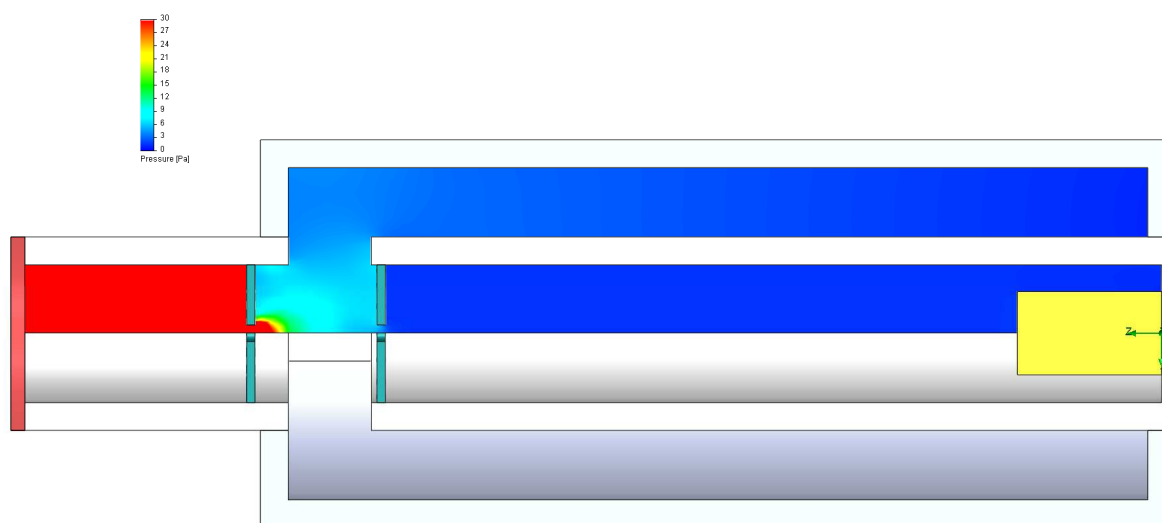


Obr. 14.7 Priebeh Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa,varianta 2-1

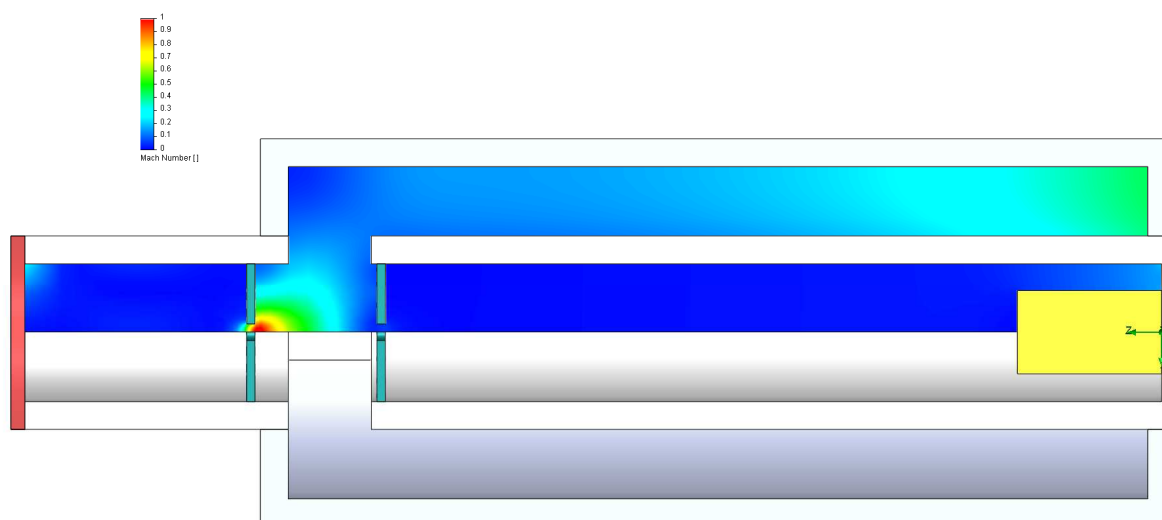


Obr. 14.8 Pribeh Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa, varianta 2-1

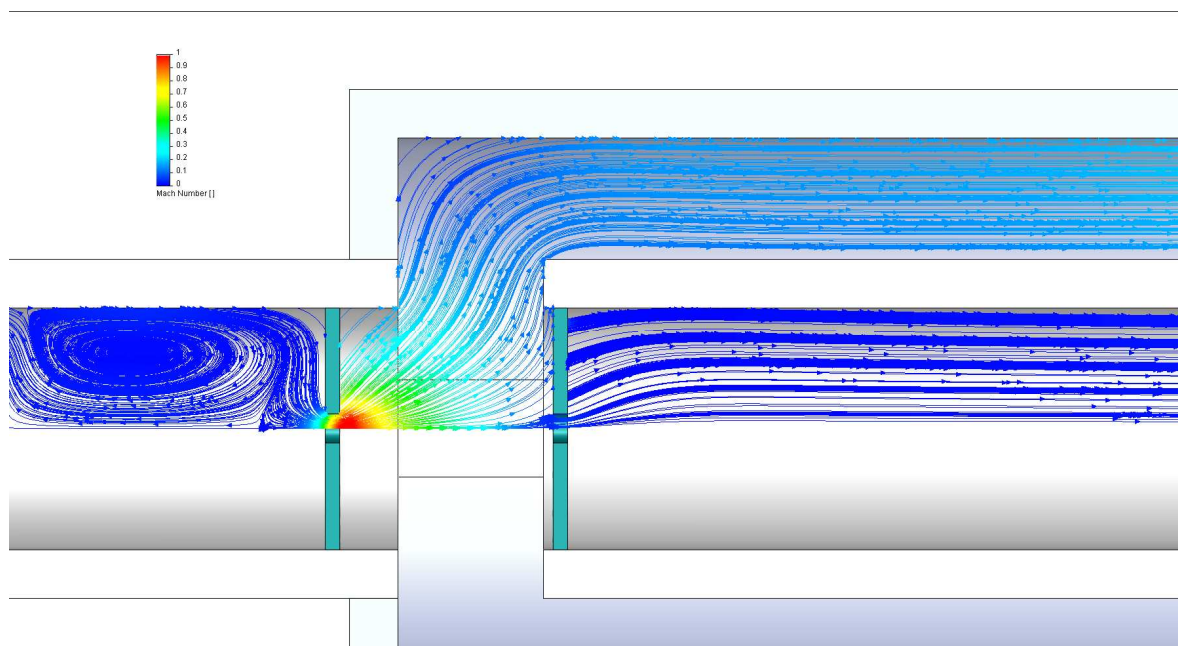
200-2-2



Obr. 14.9 Pribeh tlakov pre tlak v komore 200 Pa,varianta 2-2

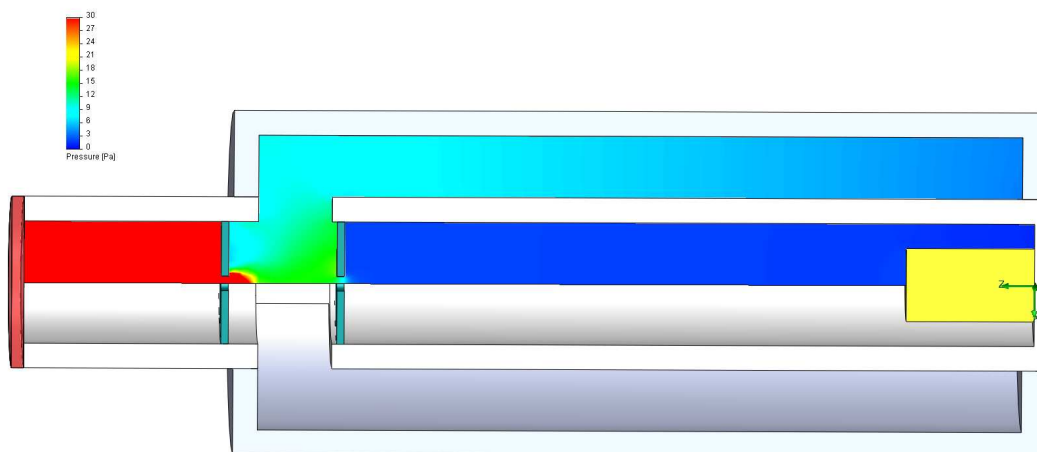


Obr. 14.10 Pribeh Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa,varianta 2-2

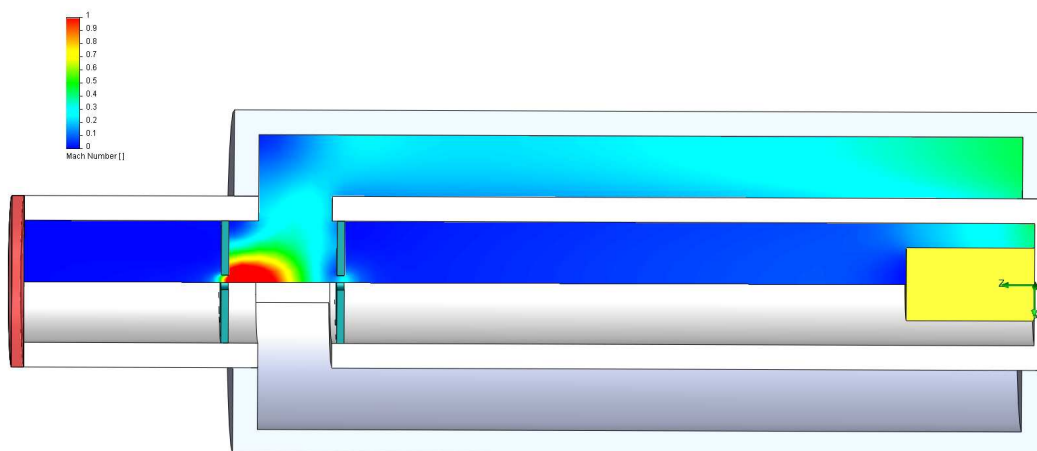


Obr. 14.11 Pribeh Machovho čísla pre tlak v komore 200 Pa,varianta 2-2

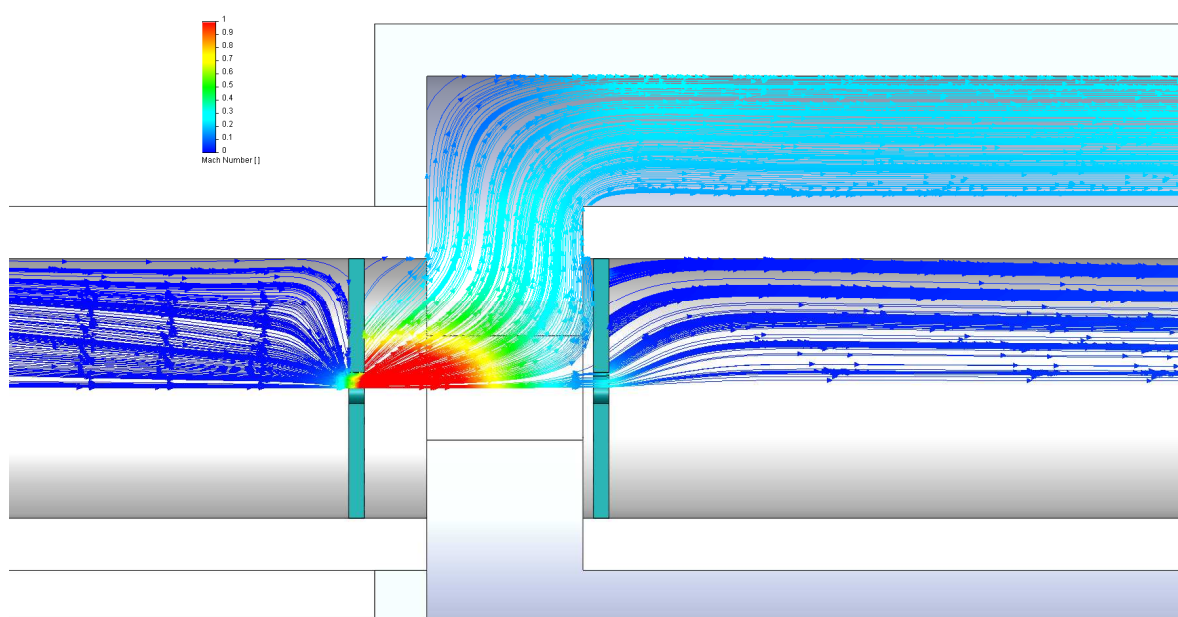
1000 – 1-1



Obr. 14.12 Pribeh tlakov pre tlak v komore 1000 Pa,varianta 1-1

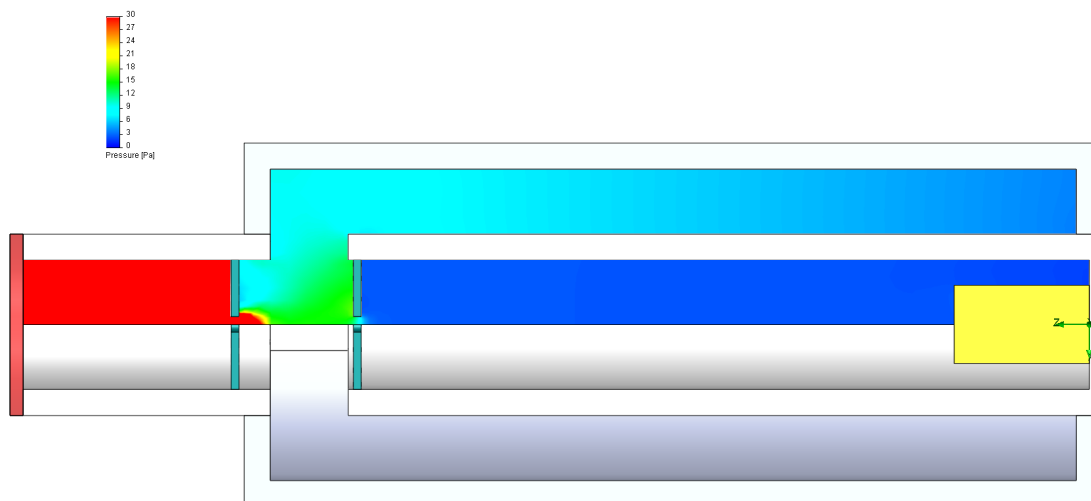


Obr. 14.13 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa,varianta 1-1

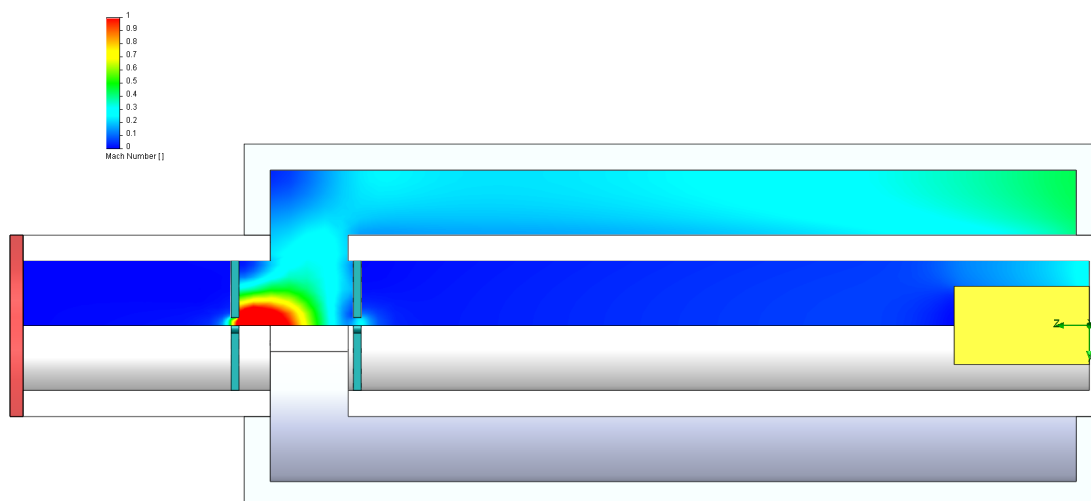


Obr. 14.14 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa,varianta 1-1

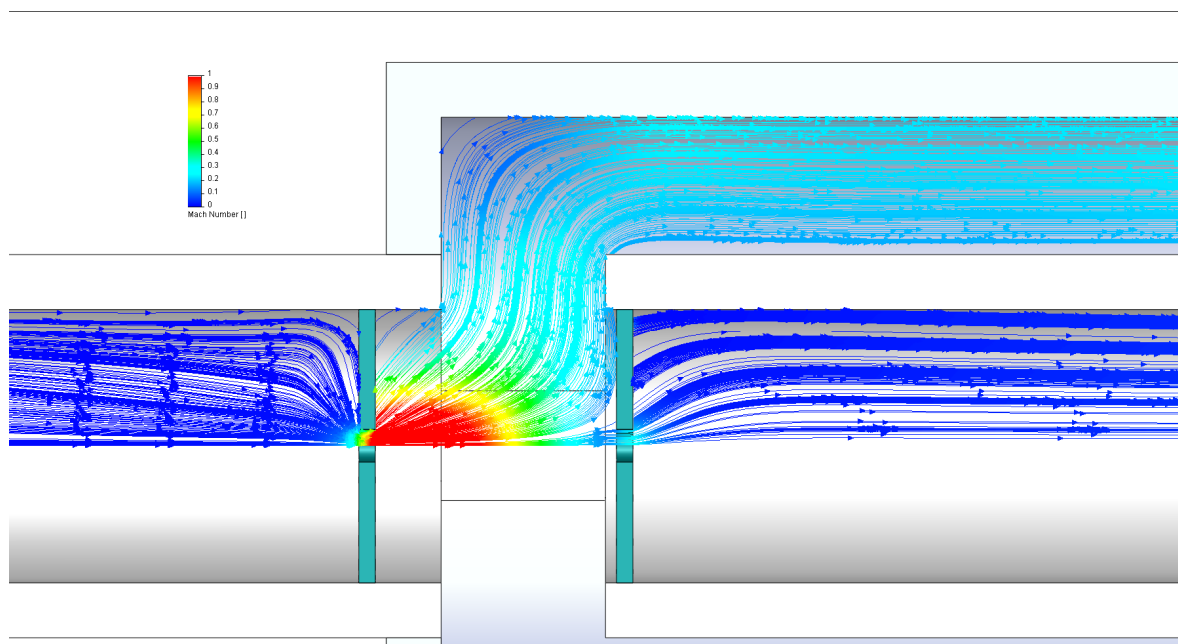
1000 -1-2



Obr. 14.15 Priebek tlakov pre tlak v komore 1000 Pa,varianta 1-2

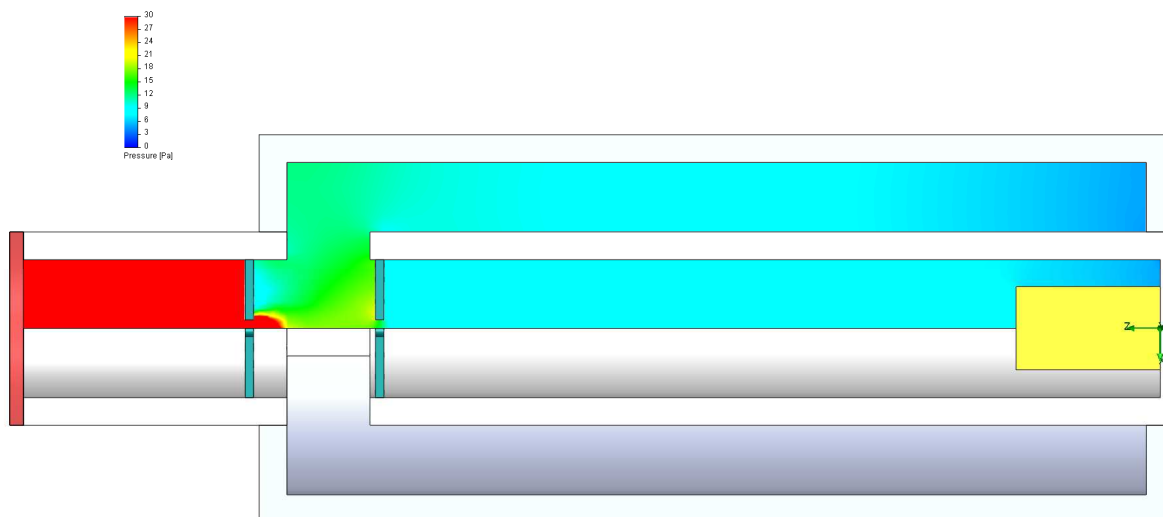


Obr. 14.16 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa,varianta 1-2

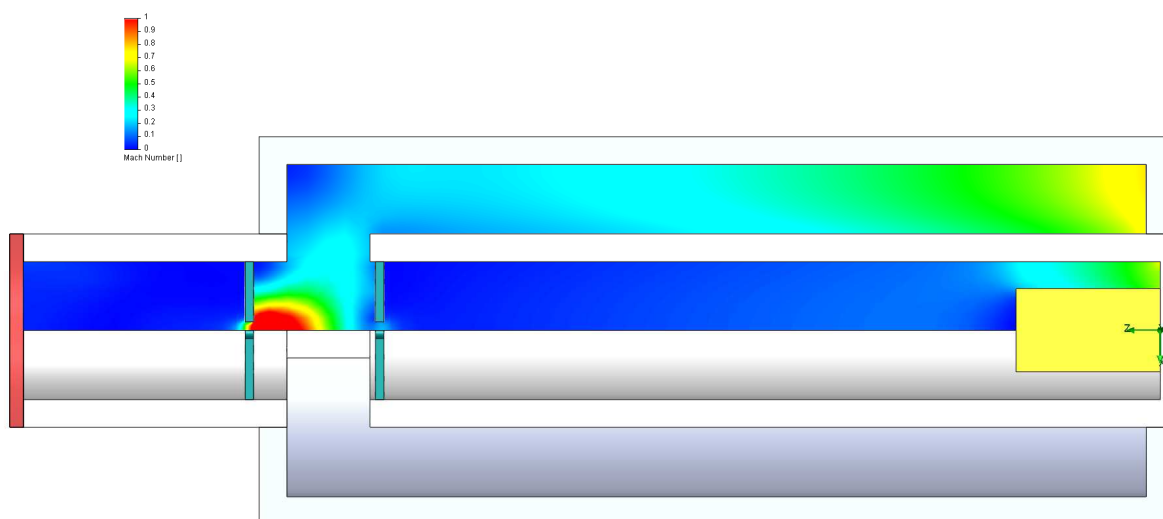


Obr. 14.17 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa, varianta 1-2

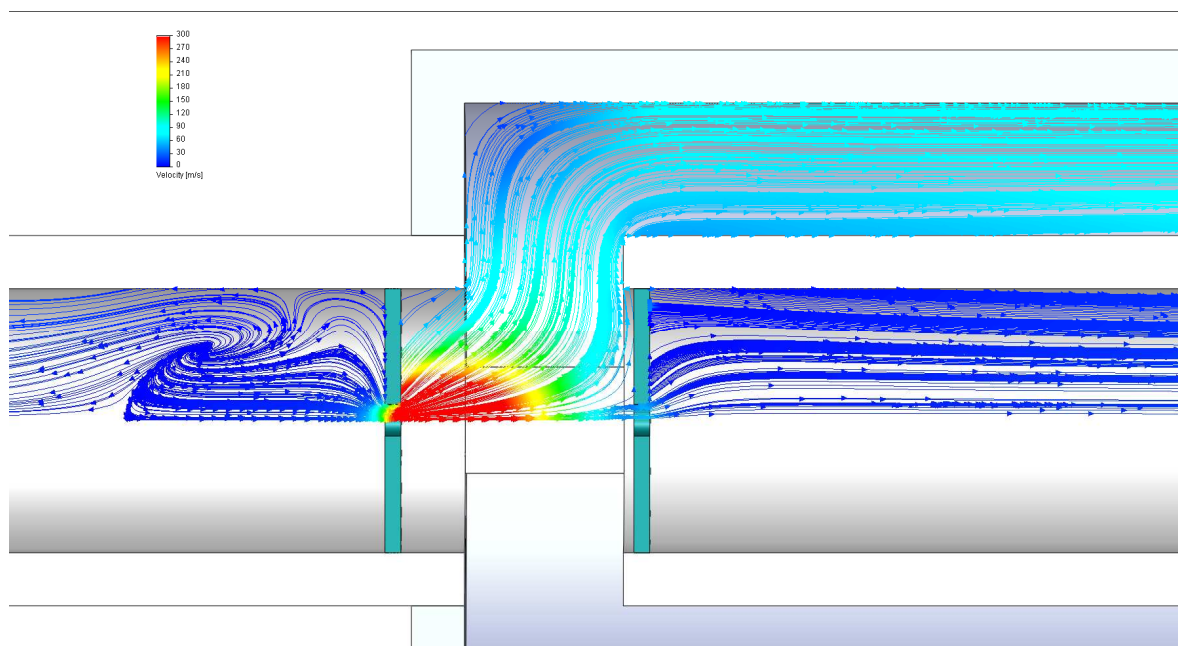
1000-2-1



Obr. 14.18 Pribeh tlakov pre tlak v komore 1000 Pa,varianta 2-1

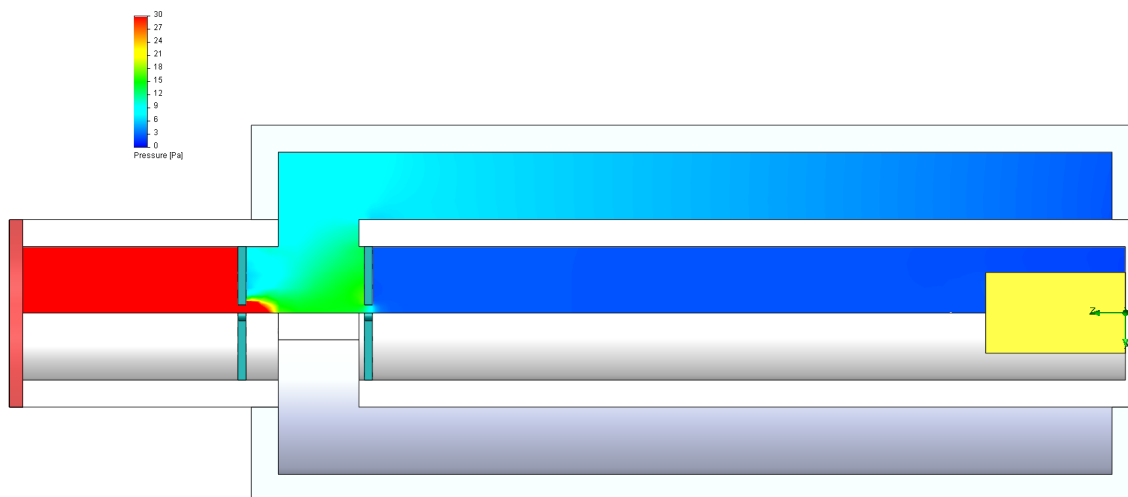


Obr. 14.19 Pribeh Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa,varianta2-1

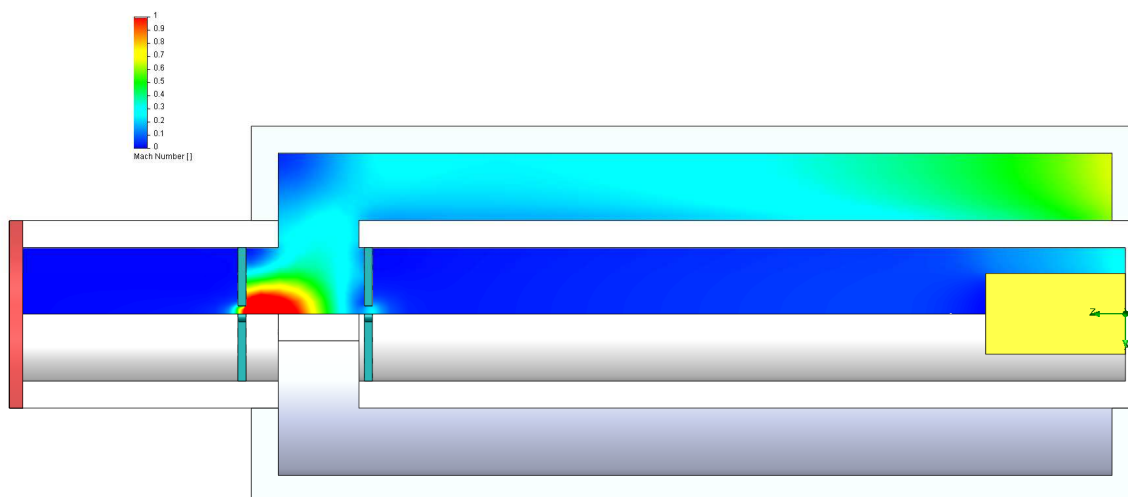


Obr. 14.20 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa,varianta2-1

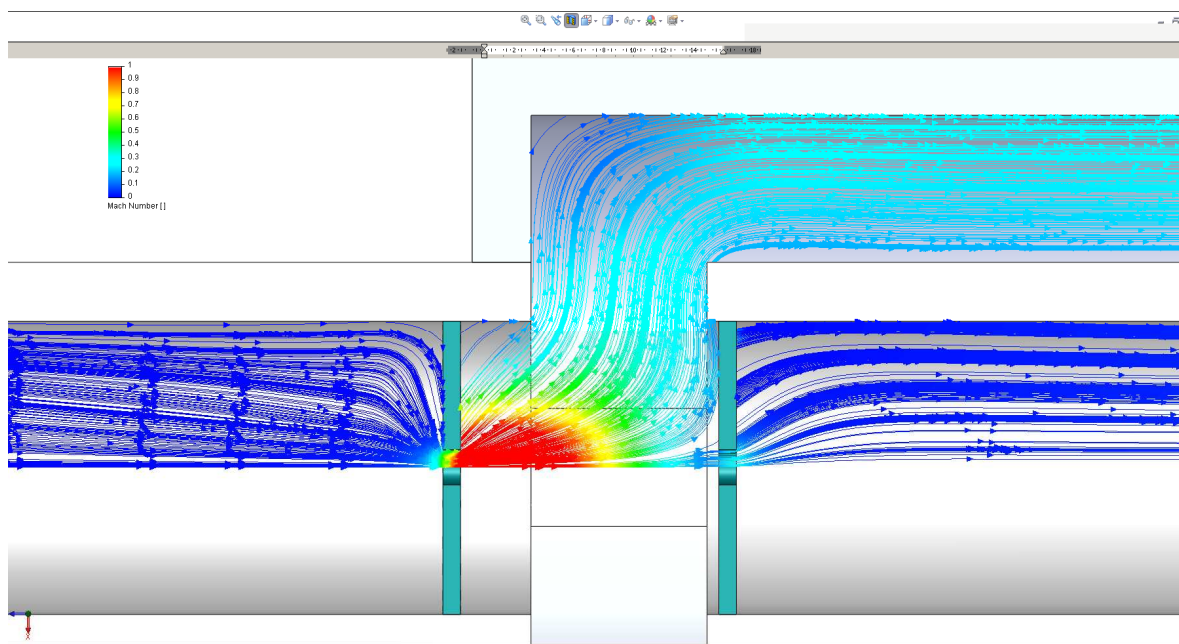
1000-2-2



Obr. 14.21 Priebek tlakov pre tlak v komore 1000 Pa,varianta 2-2



Obr. 14.22 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa,varianta2-2



Obr. 14.23 Priebek Machovho čísla pre tlak v komore 1000 Pa,varianta2-2